

港 湾 技 研 資 料

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

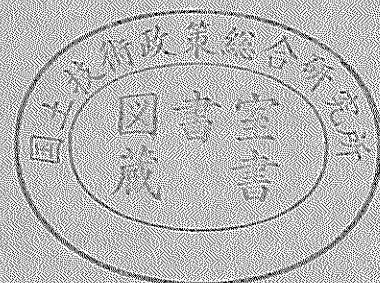
No.313

Mar. 1979

高出力マイクロ波破碎機による岩石破碎

高	橋	英	俊
小	岩	苔	生
宮	崎	昭	児
木	原	純	孝
松	本		茂

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 100kW破碎機	3
2.1 構成および仕様	3
3. 200kW合成装置	4
3.1 構成および仕様	4
3.2 合 成 原 理	4
4. 破碎実験概要	5
4.1 供試岩石および実験条件	6
4.2 測定項目および測定方法	6
5. 破碎状況および破碎量	8
5.1 破 碎 状 況	8
5.2 破 碎 量	9
6. 温 度 分 布	10
7. 岩 石 試 験	11
8. ま と め	13
9. あ と が き	13
参 考 文 献	14
記 号 表	14
付録. 加熱原理	14

Rock Excavation by Microwave

– Capability of high power microwave rock breaker (100Kw, 200Kw)
for rock excavation –

Hidetoshi TAKAHASHI*

Taisei KOIWA**

Shoji MIYAZAKI***

Sumitaka KIHARA*

Shigeru MATSUMOTO****

Synopsis

This paper reports rock excavation experiments by The Microwave Rock Breaker equipped a 100Kw Magnetron with the frequency of 915MHz and by The Coupling Device which couples two out put powers of two Microwave Rock Breakers into one 200Kw out put power as one Microwave Rock Breaker.

Target materials were granite, andesite, limestone, sandstone and mortar block.

The experimental results of excavation showed that excavation capability of The Breaker for rock specimens increased with increase of out put power of The Breaker, and increased with increase of out put energy of The Breaker.

Strength measurements were made on the rock specimens in terms of Shmidt Hammer repulsion, uni-axial compressive strength, elastic wave propagating velocity and tenacity before and after the microwave radiation to the specimens.

The results showed that the strength of the rock specimens were lessened by the microwave radiation.

It was concluded that The Microwave Rock Breaker and The Coupling Device would be able to be used for practical rock excavation works by increase of out put power more than 200Kw, and conventional mechanical dredge such as a grab bucket can break hard rocks such as granite after the microwave radiation.

* Senior Research Engineer, Machinery Division

** Head of Machinery Division

*** Chief of the Working Craft Developing Laboratory, Machinery Division

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

高出力マイクロ波破碎機による岩石破碎

高橋英俊*
小岩生**
宮崎児***
木原孝****
松本茂*****

要 旨

本報告では国内で最高出力を持つ100kWマグネトロンを装備した100kW破碎機、また100kW破碎機2台の出力を合成する200kW合成装置を用いた岩石破碎実験について述べている。

破碎実験は花こう岩(稲田産)、安山岩(伊豆西岸産)、石灰岩(栃木産)、砂岩(房総産)、モルタルブロック(28日強度 200kgf/cm^2 (1960N/cm^2))について行なわれ、それぞれ照射エネルギー(出力電力-反射電力)×照射時間が増加すると破碎量(掘削体積又はクラック全長)が増加し、また単位照射エネルギー当りの破碎量も出力の増加によって増加する傾向にある(但し、花こう岩、モルタルブロックは照射器、出力等の関係で必ずしも増加していない)ことが確認され、出力を増加することの効果が大であることが判明した。

マイクロ波照射により、岩石の機械的性質の変化を調べるために、マイクロ波照射前後のシュミットハンマー反発度、一軸圧縮強度、弾性波(伝播)速度を測定し、それぞれ照射後の値が減少し、劣化することを確認した。従って花こう岩といった硬質岩盤でもマイクロ波照射によって従来のグラブ、重錘式砕岩船等によるしゅんせつ(浚渫)も期待できると思われる。

1. まえがき

電磁波(電波)のマイクロ波帯の加熱作用は古くから知られており、工業、食品加工、医療といった分野で応用されており、特に家庭用の電子レンジとしてなじみが深い。当所ではこの加熱作用によってできる温度勾配による熱応力を海底岩盤の破碎に応用すべく昭和45年度から基礎研究がなされて来ている。

これまで30kW破碎機および水中破碎実験用実験装置の試作*が行われ、各種照射器の電力密度、照射距離(照射器と岩石供試体との距離)と反射電力との関係が測定されている。またモルタルブロックおよび花こう岩内部の温度分布、その破碎量を測定し、破碎過程のシミュレーション法が提案されており、岩石の破碎性について検討されている**。

今回は出力の増加による破碎性への影響を調べ実用化への1ステップとするために100kW破碎機および100kW

破碎機2台を合成する200kW合成装置を製作し、これらによる破碎実験を行ったので報告する。またこれらの製作と実験は作業船整備費による砕岩船開発試験の一環として行われたものである。

2. 100kW破碎機

2.1 構成および仕様

本破碎機はマイクロ波を発振するマグネトロン、マグネトロンの出力を導波管へ導くマグネトロンマウント、反射波がマグネトロンへ戻るのを防ぐために磁界により反射波を曲げて吸収するアイソレーター、各種電源回路、保護回路および装置、冷却水系配管、マイクロ波を導く導波管、導波管中を通過するマイクロ波電力を測定するパワーモニター、マイクロ波を対象物に放射する照射器、リモートコントロール装置等により構成されており図1-2.1にその構成図を示す。

* 機材部 掘削機構主任研究官
** 機材部長
*** 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
* 文献2)
** 文献1)

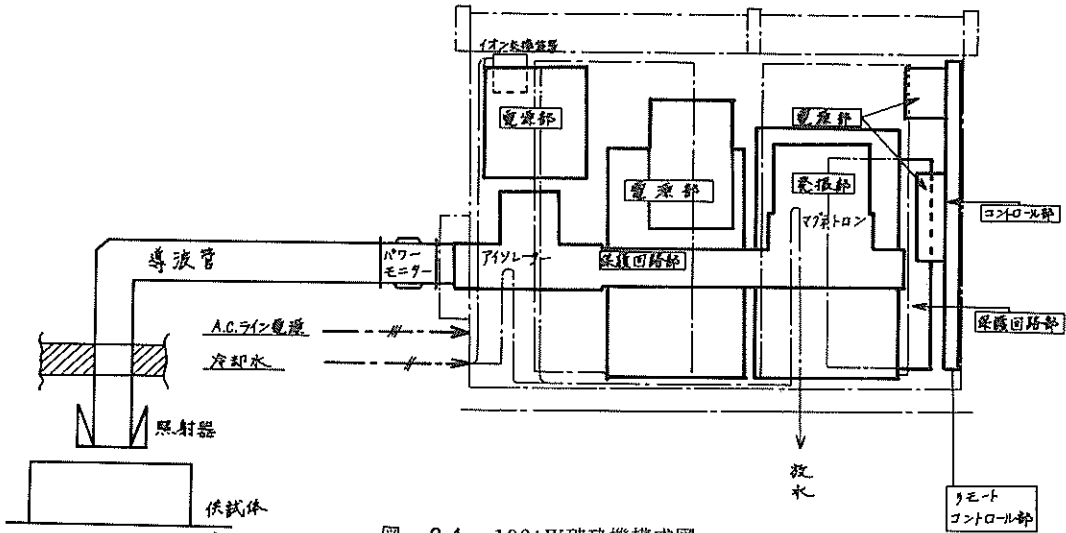


図-2.1 100kW破砕機構成図

次に本機の仕様を示す。

- | | |
|-------------|---|
| 1) 発振周波数 | 915 ± 25MHz 固定 CW |
| 2) 出力 | 30 ~ 100kW 連続可変 |
| 3) 発振管 | マグネトロン (M1287) |
| 4) 発振方法 | 自動, 連続発振 |
| 5) 許容反射電力 | 30 kW |
| 6) 出力導波管 | WRJ-1 (WR-975相当) |
| 7) 冷却 | 水冷
温度 +5 ~ +25°C
流量 90 l/min 以上
水圧 3kgf/cm ² (29.4N/cm ²)
以下 |
| 8) 電源 | AC200V 3相 50/60Hz
180KVA |
| 9) 使用条件 | 屋内
温度 +5 ~ +30°C
湿度 40 ~ 90% |
| 10) 寸法および重量 | 2,360mm(W) × 3,500mm(D) ×
2,470mm(H)
5,000 kgf (49,000N) |

3. 200kW合成装置

本装置は国内で最大出力を持つ100kW破砕機2台の出力を合成するために新たに開発されたものである。

3.1 構成および仕様

本装置は2本の入力電波管, 2台のバンドパスフィルター (BPF), Y形ジャンクション, 出力導波管, 位相調整部, 60°Eバンド, 放電防止用ブロー等で構成さ

れており図-3.1に構成図を示す。

次に本装置の仕様を示す。

- | | |
|------------|---|
| 1) 周波数 | 915 ± 25MHz 中の2周波 |
| 2) 電力 | 入力側 最大 100kW × 2
出力側 最大 200kW |
| 3) 合成効率 | 80% |
| 4) 導波管 | 入出力側共 WRJ-1
一部フレキシブル |
| 5) 電源 | AC200V 3相 50Hz 3KVA |
| 6) 使用条件 | 屋内
温度 +5 ~ +30°C
湿度 40 ~ 90% |
| 7) 寸法および重量 | 1,160mm(W) × 4,200mm(D)
× 2,300mm(H)
1,000 kgf (9,800N) |

3.2 合成原理

図-3.2に示す様に合成装置には2つの入力があり, これらをそれぞれNo. 1, No. 2とし, その入力電力および周波数を P_1, f_1, P_2, f_2 とする。またバンドパスフィルターもそれぞれ BPF_1, BPF_2 とし, 電力通過効率を η_1, η_2 とする。さらにY形ジャンクションの通過効率をそれぞれ η'_1, η'_2 とする。

No. 1入力から入ったマイクロ波 (電力 P_1 , 周波数 f_1) は BPF_1 を低損失で通過し (通過効率 η_1), Y形ジャンクションで2分割されて一方は出力側に他方は BPF_2 側に行く。しかし BPF_2 は周波数 f_1 に対してカットオフ状態であるためY形ジャンクションと BPF_2 との間で干渉が起り定在波 (スタンディングウェーブ) が生ずる。し

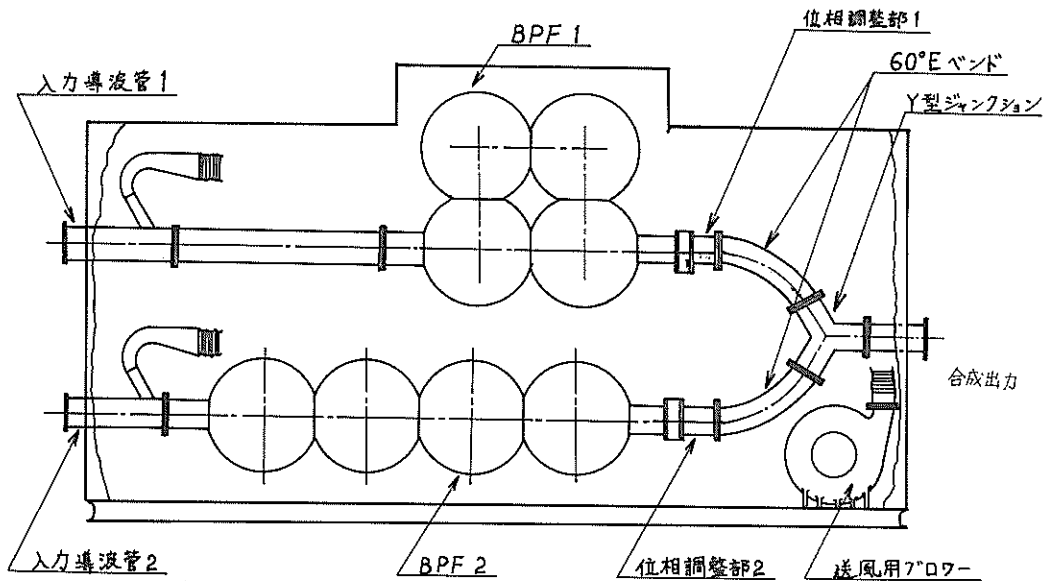


図-3.1 200kW合成装置構成図

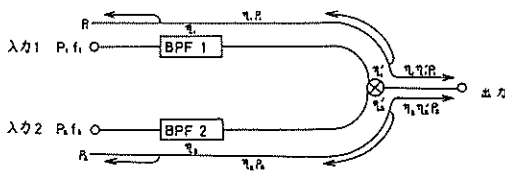


図-3.2 合成原理図

たがってY型ジャンクションとBPF₂の間の電気長(位相)を周波数 f_1 に対して適当に選ぶことにより、No.1側から入ったマイクロ波(P_1, f_1)はBPF₂には入らず出力側に出て行く。またNo.2入力から入ったマイクロ波(P_2, f_2)も同様に出力側に導かれる。

この時の合成効率を η とすると、

$$\eta = \frac{\eta_1 \eta_1' P_1 + \eta_2 \eta_2' P_2}{P_1 + P_2} \times 100(\%) \dots\dots (3.1)$$

で表わされる。

4. 破碎実験概要

本破碎実験は出力増加によってどの様に破碎性が変わるかを調べるため、100kW破碎機および200kW合成装置を用いて岩石の破碎を行ったものであり、また水中での破碎を考慮して水中に浸した岩石についても行ったものである。

破碎実験を100kW破碎機による屋内実験と200kW合成装置を用いた屋外実験の2回に分けて行なった。前者ではマイクロ波を上方より垂直に岩石に照射したのに対

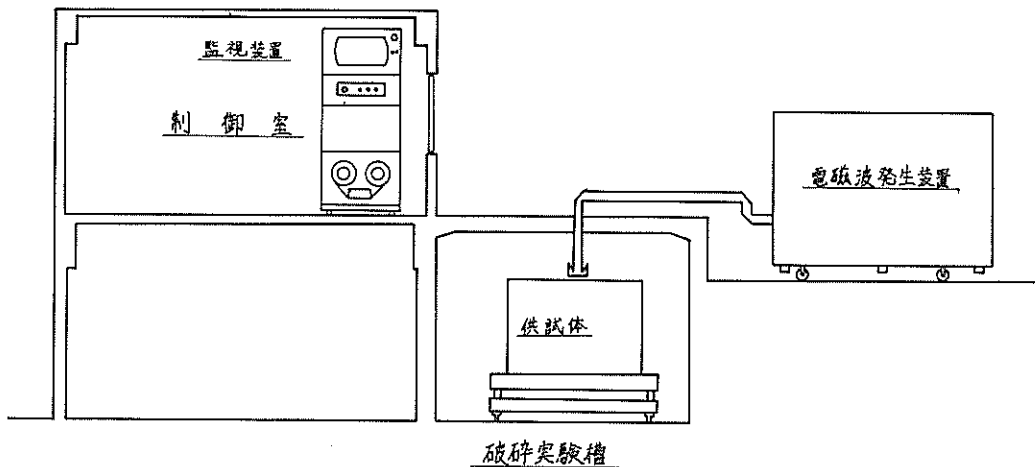


図-4.1 実験配置図(屋内)

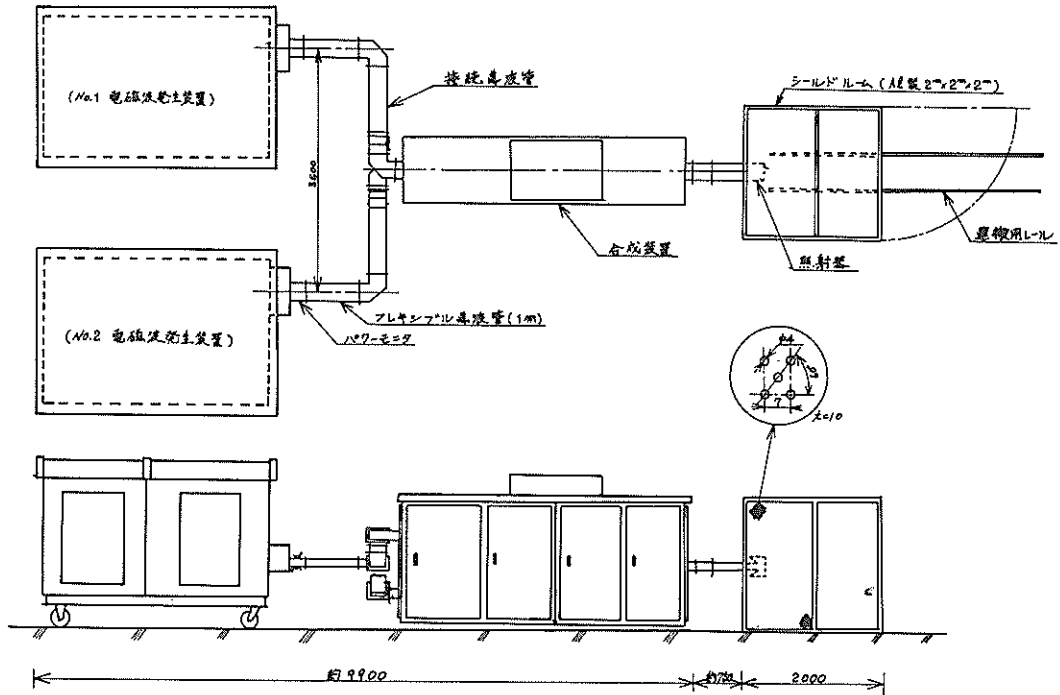


図-4.2 実験配置図(屋外)

し、後者では横方向から直角に岩石に照射したため、モルタルブロックの破砕実験では破砕片の挙動が異っている他は、出力と照射時間以外はほとんど同じ条件下で行った。図-4.1、図-4.2 にそれぞれの実験配置図を示す。

実験は照射器を岩石に対して一定距離(40mm)に固定して、マイクロ波を直角に照射して行い、またマイクロ波の照射中は破砕状況をカラーVTRで、電力、反射電力を記録計により監視し記録した。

4.1 供試岩石および実験条件

供試岩石として強度が大きくマイクロ波を吸収しにくい岩石として花こう岩と石灰岩、強度が大きく比較的マイクロ波を吸収し易い岩石として安山岩、強度が小さくマイクロ波を吸収し易い岩石として砂岩、モルタルブロックを選んだ。また石灰岩を除き、岩石内部の温度分布を測定するために真中より2分割して、再び合わせた供試体も使用した。表-4.1にこれら供試岩石の寸法等を示す。

実験条件は、照射エネルギー(出力電力-反射電力)×照射時間)に対する破砕量、また出力に対する単位照射エネルギー当りの破砕量を調べるため、最初に出力を設定して照射時間を変化させる事とし、放電等でやむを得ず照射を中断した場合には、100 kW 破砕機を用いた

時はなるべく再照射することとし、200 kW 合成装置を用いた時は危険を伴うため、そこで中止することにした。また水中での破砕を想定して水中に浸した花こう岩(照射面は5~10 mm 空中に出ている)とモルタルブロック(照射面は5~10 mm 水中に浸っている)の破砕も行うことにした。出力は100 kW という高出力のため放電等の危険を避けるため表-4.1に示す値とした。

4.2 測定項目および測定方法

マイクロ波照射エネルギーに関するものとして、マグネトロン陽極電圧および電流、出力導波管を通過するマイクロ波電力および負荷側からの反射電力照射時間を測定、記録した。

破砕量に関するものとして、砂岩およびモルタルブロックの場合はできたクレータ状の破砕跡を標準砂で置換しその体積、また花こう岩、安山岩、石灰岩の場合は、底面を除く5面の表面のクラックの全長を総和してその合計長さを破砕量としてスケールによって測定した。

温度分布は赤外線スポット温度計およびサーモカメラにより測定面の温度を等温線として表示した。

表-4.1 供試岩石, 実験条件および実験結果

岩石名	実験番号	寸法 (mm)	設定出力 (kW)	照射エネルギー (kW・min)	破砕量 (lit又はmm)	単位照射エネルギー当りの破砕量 (lit/kWmin又はmm/kWmin)	備考
花こう岩	No. 1	720×880×1110	60	1,005.56	5,310 (mm)	5.28	
#	No. 2	800×800×800	60	988.91	3,440 #	3.48	
#	No. 3	800×800×700	60	407.70	1,900 #	4.64	
#	No. 4	1080×1180×1000	63	512.32	8,900 #	17.37	放電
モルタルブロック	No. 1	1000×1000×500	55	46.16	1.5 (lit)	0.0325	
#	No. 2	#	55	96.16	4.0 #	0.0416	
#	No. 3	#	55	100.82	6.8 #	0.0676	
#	No. 4	#	64	27.07	0.7 #	0.0248	
#	No. 5	#	50	118.32	5.6 #	0.0472	
#	No. 6	#	49	86.86	5.0 #	0.0576	
#	No. 7	#	49	154.52	8.2 #	0.0529	
#	No. 8	#	55	93.36	5.6 #	0.0598	
#	No. 9	700×700×400	49	74.19	3.1 #	0.0419	
#	No. 10	#	50	308.88	12.2 #	0.0395	
#	No. 11	#	50	283.37	11.1 #	0.0393	
#	No. 12	#	50	120.05	6.0 #	0.0501	
#	No. 13	#	50	155.35	7.8 #	0.0499	
花こう岩	D-3・1	1010×1040×1010	60	621.0	-	-	2分割
#	D-1	1030×1030×1020	50	444.3	-	-	
#	D-2	1030×1030×1000	60	594.9	-	-	
#	d-1	1070×1140×1000	50	457.2	-	-	水中
#	d-3	1020×1100×1020	60	563.9	-	-	#
#	d'-3	1070×1140×1000	60	2,060.5	4,550 (mm)	2.21	#
安山岩	C-3・1	1000×1000×950	60	530.5	-	-	2分割
#	C-1	1100×1000×850	50	438.1	7,550 #	17.23	
#	C-2	1200×1050×1100	55	408.9	11,070 #	27.07	
#	C-3	1000×1100×900	60	405.5	6,040 #	14.90	放電
砂岩	B-3・1	1200×1000×650	60	164.6	-	-	2分割
#	B-1	800×1000×750	60	64.3	1.73 (lit)	0.0269	放電
#	B-2	900×900×700	60	82.7	1.68 #	0.0203	
#	B-3	700×900×800	60	204.7	3.30 #	0.0161	放電
モルタルブロック	A-3・1	1000×1000×1000	60	86.9	-	-	2分割
#	A'-3・1	#	60	169.3	-	-	#
#	A-1	1000×1000×500	60	174.5	5.91 #	0.0339	
#	A-3	#	60	95.7	4.22 #	0.0441	
#	a-1	#	60	201.1	3.39 #	0.0169	水中(冠水)
#	a-3	#	60	114.6	4.19 #	0.0366	水中
花こう岩	Gr-C ₁	1260×1170×1010	102	1,492	7,430 (mm)	4.98	
#	Gr-C ₂	1200×1100×1010	98	707	880 #	1.24	
#	Gr-C ₃	1180×1170×1010	102	1,033	-	-	2分割
#	Gr-C ₄	1180×1170×1010	95	690	-	-	#
安山岩	An-C ₁	830×880×620	98	303	7,090 #	23.40	
石灰岩	Li-C ₁	1000×750×1170	109	315	1,950 #	6.19	
モルタルブロック	Mo-C ₁	1000×1010×1010	94	77	4.0 (lit)	0.0520	
#	Mo-C ₂	1000×1000×1000	89	124	3.7 #	0.0300	
#	Mo-C ₃	1010×1000×1000	94	101	-	-	2分割
#	Mo-C ₄	1000×1000×1000	91	212	-	-	#

5. 破碎状況および破碎量

5.1 破碎状況

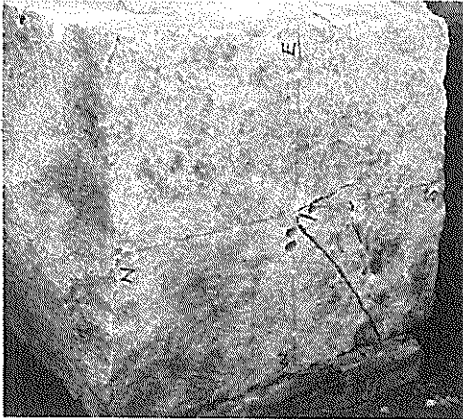
砂岩およびモルタルブロックはマイクロ波を照射すると間もなく（10秒前後）激しい破碎音と共に連続的に表面がはく離し、クレーター状の破碎跡となる。しかしある程度破碎が進むと、照射距離（照射器と岩石との距離）が変化し、インピーダンスミスマッチング状態になり（最初反射電力の最も少ない照射距離（40 mm）にセットしてあり、この状態でインピーダンスマッチング状態とする。）反射電力が大きくなり、岩石に吸収される電力が小さくなることによりはく離の時間間隔がしだいに大きくなって行き、遂には許容電力を上まわり照射不能となる。また照射面に破砕片が堆積すると照射距離が小さくなり、破砕片と照射器との間で放電する場合もある。水中に浸したモルタルブロックでは、照射面上部の水にマイクロ波電力の一部が吸収され、岩石に吸収される電力

は比較的小さくなっており、また水を含んだためモルタルブロックの特性の変化（特に誘電率と誘電体力率における変化）のため、破碎状況は空中の場合とは異なり照射後しばらくしてから急激に大きな破碎音を伴って一度にはく離し、空中と同様のクレーター状の破碎跡となるが破砕片ははるかに大きい。

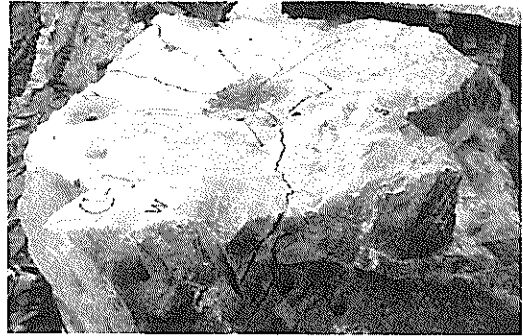
安山岩の場合は照射開始直後（10数秒程度）に小さな破碎音を伴って極く薄くはく離し、後に急激に照射面中央より放射状にクラックが成長する。

花こう岩および石灰岩の場合は照射後しばらく（数分程度）してから照射面中央よりゆっくりとクラックが成長する。水中に浸した花こう岩の場合はほとんど空中と同様であり、クラックの中に侵入した水が加熱されて水蒸気となり照射面から噴出するが、破碎には関与していない様に思われる。

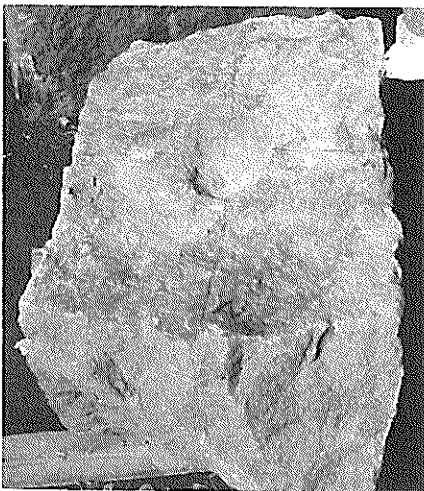
図-5.1に各種岩石の破碎例を示す。



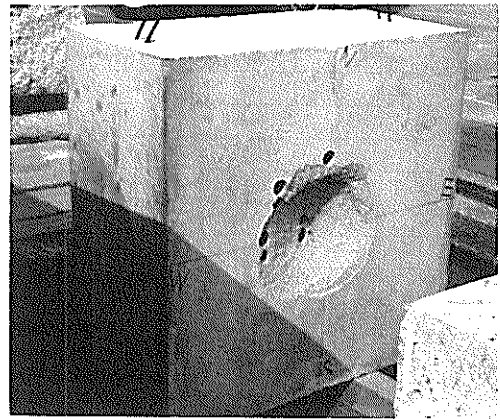
1. 花崗岩（60 kW 6分51秒水中）



2. 安山岩（50 kW 9分50秒）



3. 砂岩（60 kW 10秒）



4. モルタルブロック（60 kW 3分水中）

図-5.1 破 碎 例

5.2 破 碎 量

図-5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6に示す様に各種岩とも照射エネルギーが増加すると破砕量も増加する傾向にあるが、モルタルブロックおよび砂岩の場合には、出力が大きいと破砕が急激に行われるため、短時間の中に反射電力が大きくなり照射不能となってしまう、大きな照射エネルギーを与えることができなくなってしまう

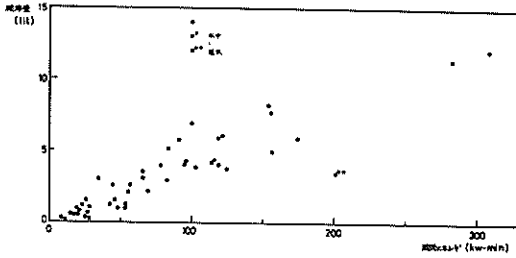


図-5.2 破砕量と照射エネルギー(モルタルブロック)

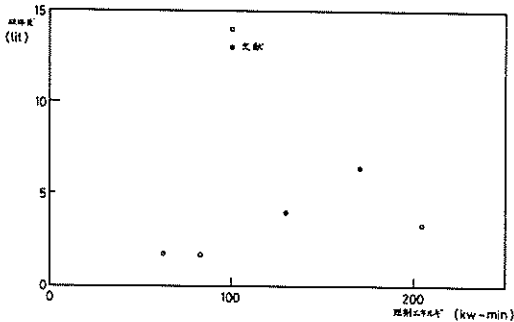


図-5.3 破砕量と照射エネルギー(砂岩)

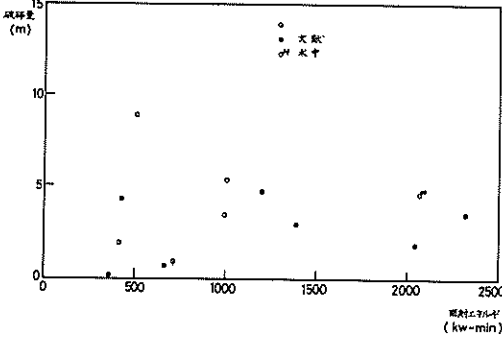


図-5.4 破砕量と照射エネルギー(花こう岩)

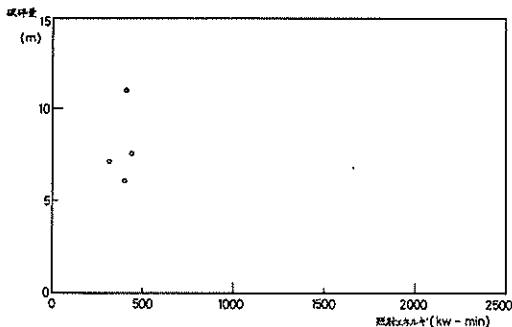


図-5.5 破砕量と照射エネルギー(安山岩)

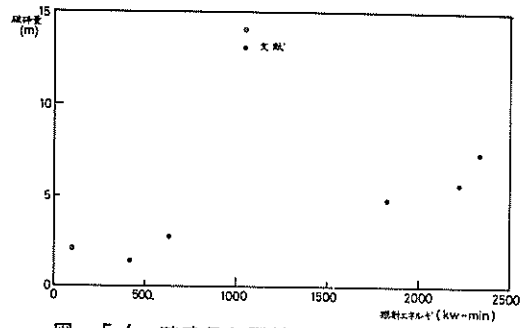


図-5.6 破砕量と照射エネルギー(石灰岩)

う。これは今回使用した照射器は各種岩石に対して同一のものを使用しているために、その岩石に最適な電力密度分布とは必ずしも言えないためであると推定される。従ってモルタルブロック、砂岩といったマイクロ波を吸収し易く短時間で破砕される岩石は、電力密度を小さくして広範囲に大きな破砕片となる様に破砕するのが望ましく、そのため開口面積の大きい照射器が必要となる。

次に岩石の破砕効率を表すものとして単位照射エネルギー当りの破砕量を採り、出力に対して図示すると図-5.7, 5.8, 5.9, 5.10となる。

モルタルブロックの場合には出力60kW付近で最大となる様に見受けられる。これは今回使用した照射器が前述の如く同一のものであり、その電力密度分布が出力60kW付近で最適だった事を示すものである。したがってより

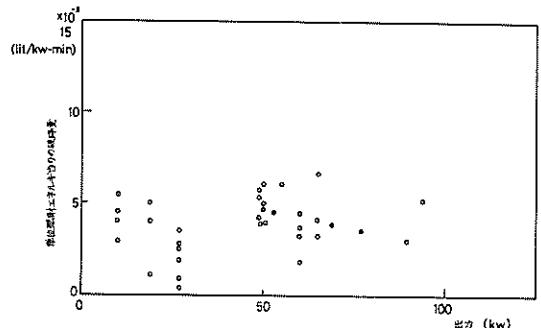


図-5.7 単位照射エネルギー当りの破砕量と出力(モルタルブロック)

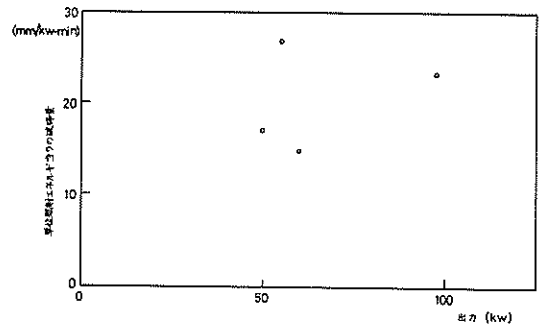


図-5.8 単位照射エネルギー当りの破砕量と出力(安山岩)

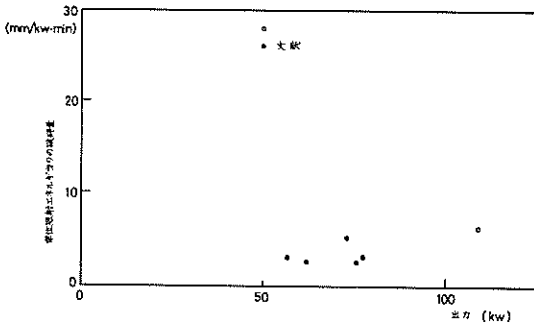


図-5.9 単位照射エネルギー当りの破砕量と出力 (石灰岩)

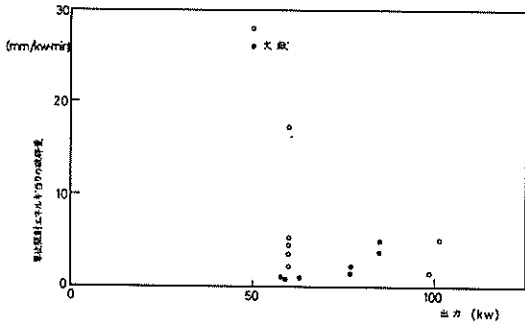


図-5.10 単位照射エネルギー当りの破砕量と出力 (花こう岩)

出力を増加する場合には照射器の開口部を広げる等の対策が必要となる。さらに破砕の進行に従って照射距離が変化するのであるから、この時のインピーダンス変化に追従するインピーダンスマッチング装置の採用が望ましい。

安山岩および石灰岩の場合は出力の増加によって、破砕効率が増加する傾向が著しく、さらに出力を大きくすることによりさらに向上すると推定できる。

花こう岩の場合は出力増加に対して破砕効率の向上は認められていない。これは花こう岩のマイクロ波吸収率の悪さに起因するものと考えられ、今回の出力の範囲では出力増加の傾向が現れなかったと推定される。

そこで花こう岩と安山岩の諸特性を比較してみる。まずマイクロ波の吸収率を表す誘電率と誘電体力率の積を

比較すると(表-5.1)安山岩の方が15倍大きい。比熱はだいたい同じ位であるから同じ電力密度、照射時間の場合温度上昇は安山岩の方が15倍大きいことになる。また熱応力の要因となる熱膨張率は花こう岩の方が4倍大きい。したがって簡単のため他の条件を同一と考えたならば花こう岩に安山岩と同程度の破砕効果をもたらすためには、約4倍の電力密度が必要となることを示している。

現実には花こう岩でも破砕されており、むやみに電力密度を大きくすると岩石の溶融を招きあまり得策ではない。問題はいかにして広範囲にわたって、短時間内にその岩石の破砕条件を満足する熱応力を発生させる温度分布を作り出すかということである。しかしこれは、熱応力発生に関係するファクターが多くしかも温度に依存している事を考えると容易な事ではないが、各種岩石の破砕に最適な電力密度分布となる照射器およびその時の出力を現在検討中である。

6. 温度分布

岩石に照射されたマイクロ波は付録に示す様に電界強度の自乗に比例した加熱作用を持っていることがわかって

まず岩石の単位体積に吸収される電力は(A-8)式より、

$$W = \frac{5}{9} f \epsilon_r \tan \delta E^2 \times 10^{-8} [W/m^3 \cdot s] \dots (6.1)$$

となる。これを熱量に換算すると、

$$Q = 1.33 f \epsilon_r \tan \delta E^2 \times 10^{-9} [cal/m^3 \cdot s] \dots (6.2)$$

となる。従って熱伝導および熱放射がないとし、単位体積重量を γ 、比熱を c とすれば単位時間当りの温度上昇 ΔT は、

$$\Delta T = \frac{1.33 f \epsilon_r \tan \delta E^2}{\gamma c} \times 10^{-9} [deg/s] \dots (6.3)$$

図-5.1 供試岩石の物理特性

岩種	項目	誘電率(ϵ_r) (22K~70MHz)	誘電体力率($\tan \delta$) (22K~70MHz)	線膨張率(α) (室温)	最大線膨張率 (温度)	比熱 (cal/g·deg)	単位体積重量 (g/cm ³)
花こう岩		6~7	0.013~0.018	0.8×10^{-5}	11.8×10^{-5} (573°C)	0.17	2.62
安山岩		9~10	0.120~0.150	0.2×10^{-5}	2.8×10^{-5} (250°C)	0.19	2.74
石灰岩		10~11	0.030	0.8×10^{-5}	4.0×10^{-5} (640°C)	0.19	2.77
砂岩		7~8	0.038~0.058	0.2×10^{-5}	4.7×10^{-5} (550°C)	0.20	2.21
モルタル ブロック		5~6	0.024	-	-	0.22	2.09

となる。ここで照射時間を t 秒とすると温度上昇は、

$$\Delta T_t = \frac{1.33 f \epsilon_r \tan \delta \cdot t \cdot E^2}{\gamma c} \times 10^{-9} [\text{deg}] \dots (6.4)$$

となる。但しここで γ , c , ϵ_r , $\tan \delta$ は温度に依存するファクターであるが簡単のため一定と考えると、マイクロ波電力が電界強度の自乗に比例することから、温度上昇 ΔT_t はマイクロ波電力と照射時間に比例することになる。しかし岩石中の電界強度またはマイクロ波電力を実測することは困難であるため、逆に温度上昇から電界強度またはマイクロ波電力を推定することにし、(6.4) 式より電界強度の自乗 E^2 について解けば、

$$E^2 = \frac{\Delta T_t \cdot \gamma \cdot c}{1.33 f \epsilon_r \tan \delta \cdot t} \times 10^{-9} [\text{V/m}]^2 \dots (6.5)$$

となる。したがって、例えば 100 kW 出力の時の温度分布より電界強度の自乗の分布を求め、出力が大きくなった時 (例えば 1,000 kW) の温度分布を推定することができる。すなわち出力が 2 倍になれば温度上昇も 2 倍になると推定できるわけである。但しこれは上述の様に温度に依存するファクターを考慮に入れなければならないのは当然であり、現在各種岩石の特性を温度別に計測する方法を検討中である。

次に実測された温度分布であるが、これは図-6.1, 6.2, 6.3, 6.4 に示す様に等温線表示である。これによると砂岩、モルタルブロックの様にクレーター状に破碎される岩石では、温度上昇する領域が照射器真

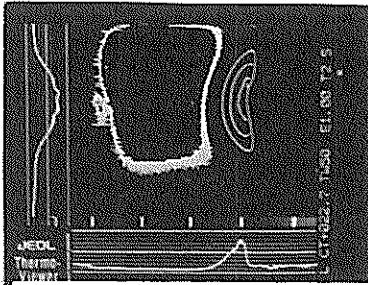


図-6.1 温度分布 (モルタルブロック)

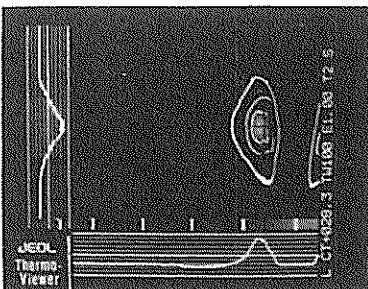


図-6.2 温度分布 (砂岩)

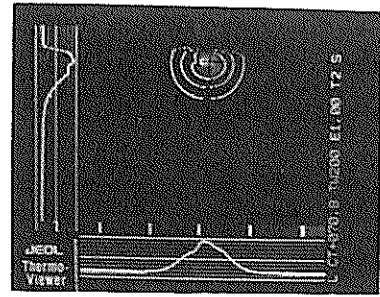


図-6.3 温度分布 (安山岩)

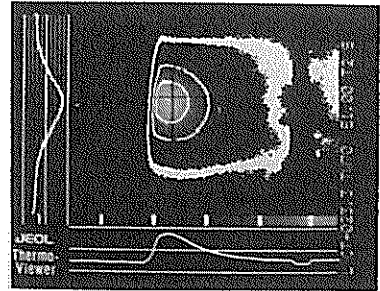


図-6.4 温度分布 (花こう岩)

下に浅く分布しており、温度勾配も急である。逆に花こう岩は深く広く分布している。安山岩はその中間と言えよう。しかし、等温線表示された図-6.1~図-6.4 では、等温線のピッチおよび温度が異なるため上記の傾向を一目で読み取ることができない。

この様な温度分布の相違が破碎形状の違いとして表れるものと思われる。したがってこの温度分布から熱応力を計算し、破碎形状を推定する方法を検討中である。

7. 岩石試験

この実験に用いた各種岩石の試験を下記の項目についてマイクロ波照射前後に岩石コアを採取して行った。

1) シュミットハンマー反発度

シュミットハンマー反発度の測定をマイクロ波照射前後に図-7.1 に示す位置で行った。但しクラックの入った場所は、できる限り近い場所を測定することにした。測定結果を図-7.2 に示すが、最初予想された加熱温度

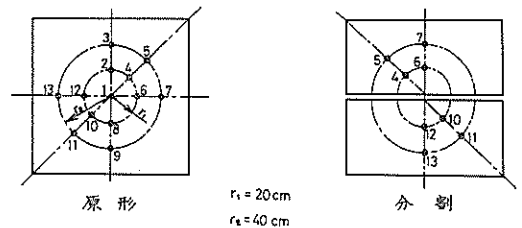


図-7.1 シュミットハンマー反発度測定位置

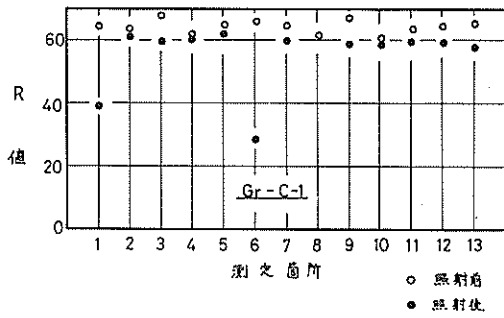


図-7.2.1 シュミットハンマー反発度(花こう岩)

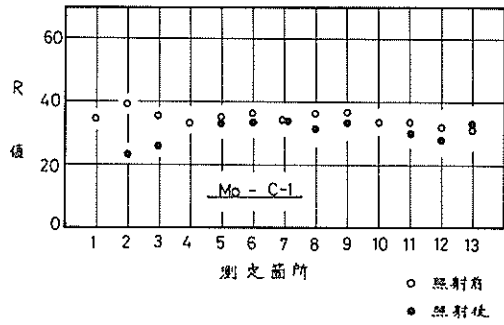


図-7.2.5 シュミットハンマー反発度(モルタルブロック)

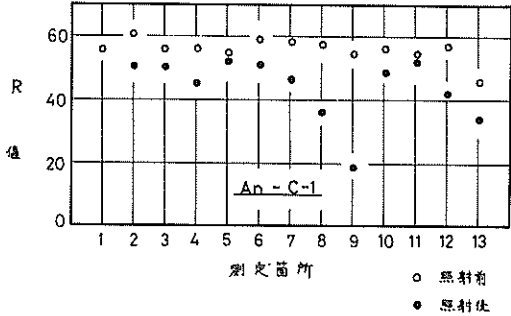


図-7.2.2 シュミットハンマー反発度(安山岩)

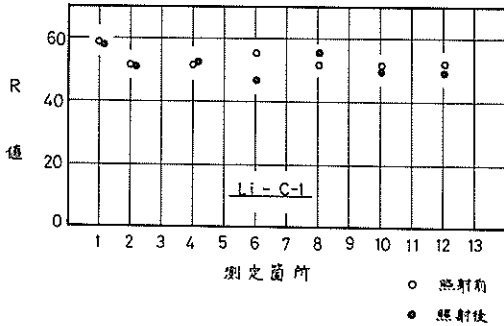


図-7.2.3 シュミットハンマー反発度(石灰岩)

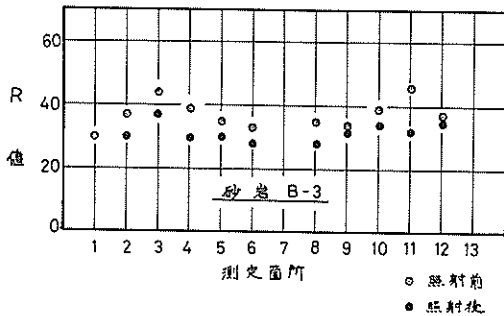


図-7.2.4 シュミットハンマー反発度(砂岩)

に対するシュミットハンマー反発度の低下(図-7.1において測定点1が最も温度が高く、反発度の低下が最も大きいと予想されていた。)の差は、明らかではない。しかしマイクロ波の照射によって反発度が低下することが確

認された。これは加熱による岩石組織の変化(結晶水の蒸発、造岩鉱物の物理、化学的变化等)によるものと、熱応力による微細クラックの発生によるものとが考えられる。

2) 弾性波(伝播)速度および一軸圧縮強度

これらは供試岩石から32φ×64mmのテストピースを切出し両端を整形して測定したものである。その切出し位置を図-7.3に示すが、破碎によって切出し不能な場合はできる限り近い場所で切出すことにした。測定結果は図-7.4に示してあるが、これらもシュミットハンマー反発度と同様に位置による低下の差が明確ではない。しかし各岩石ともマイクロ波の照射によって低下し、岩石の劣化が見受けられる。これはシュミットハンマー反発度の低下と同じ原因によるものと考えられる。

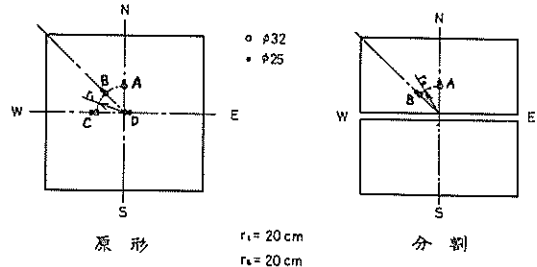


図-7.3 コアサンプリング位置

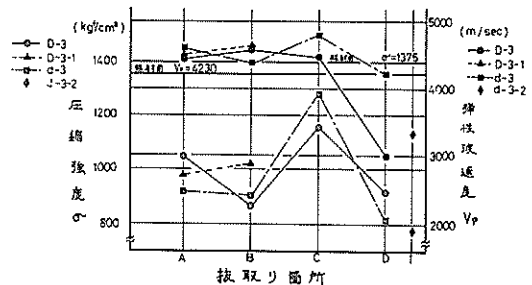
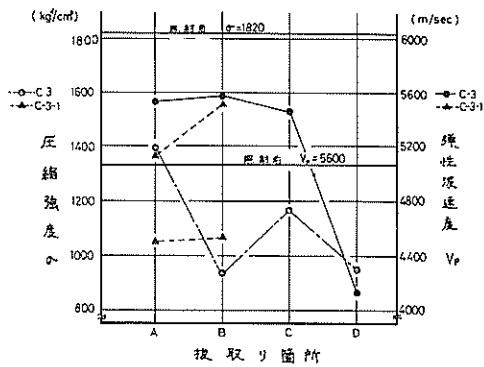
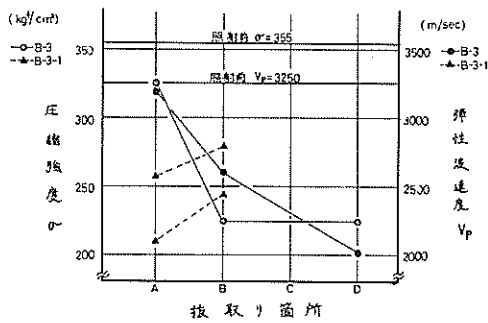


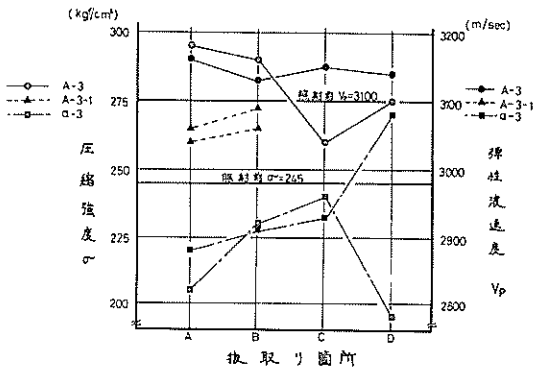
図-7.4.1 岩石強度(花こう石)



図一 7. 4. 2 岩石強度（安山岩）



図一 7. 4. 3 岩石強度（砂岩）



図一 7. 4. 4 岩石強度（モルタルブロック）

3) じん性

これは 25φ×25 mm のテストピースを用いて測定したもので、テストピースを鉄床の上に載せ 2kgf の重錘を最初 1 cm の高さから順次 1 cm 高さを増加して落下して、テストピースが破壊した時の落下高さを表す cm 数をもってじん性値としたものである。テストピース切出し位置を図一 7. 3 に示してある。結果は表一 7. 1 に示してある。この測定結果では、マイクロ波照射により低下するものと変わらないものがありマイクロ波照射による影響は明らかではない。これは重錘を 1 cm ずつ増加して落下させるとい測定方法によるところが大きいと推定され

表一 7. 1 照射前後のじん性値

供試岩	じん性値	
	照射前	照射後
モルタル	4	4～5
砂岩	4	5～6
安山岩	16	11～17
花こう岩	11	9～14

る。すなわち、1 cm ずつの測定ではじん性値の差が明確に表れなかったものと思われる。

4) まとめ

以上の様にマイクロ波照射による温度上昇によって岩石の機械的特性（強度）が低下し劣化することがわかった。したがって従来の方法でしゅんせつ（浚渫）困難な岩盤（花こう岩等）でも、マイクロ波照射による機械的特性の劣化によってしゅんせつ可能となることも十分期待できると思われる。

8. まとめ

今回の岩石破碎実験により今回製作した 100 kW 破碎機、200 kW 合成装置が花こう岩、安山岩、石灰岩、砂岩、モルタルブロックの破碎に十分使用できることがわかった。

また照射エネルギーが増加すると破碎量が増加し、出力が増加すると単位照射エネルギー当りの破碎量も増加することが判明した。しかし今回の実験の様に各種岩石に同一の照射器を使用した場合には花こう岩では電力密度が小さ過ぎ、またモルタルブロックでは 60 kW を越えると電力密度が大き過ぎるため、効果的な破碎とはなっていない様に見える。

マイクロ波の照射による岩石の劣化は今回の岩石試験の結果明らかになった。したがってマイクロ波の照射によって従来の機械的しゅんせつ方法（クラブ等）でもしゅんせつ可能になると十分期待できる。

9. あとがき

今回の破碎実験ではマイクロ波照射によって最も破碎しにくいと考えられた花こう岩でも 100 kW、200 kW で十分破碎できることがわかったが、より効果的な破碎を行うためには、岩石の諸特性に適する照射器の選択、より大きな出力の破碎機の開発が必要となるであろう。また実用化においては、遮水（水中）照射器の開発、自然岩盤（無限岩盤）の破碎性に関する研究、岩石の劣化程度の評価法の開発、現地施工機器の開発等が必要となるであろう。この中、自然岩盤の破碎性については昭和 53 年 12 月に小豆島の花こう岩について実験を行う予定であ

る。また遮水照射器のプロトタイプを当所で製作し、すでにかんりの遮水効果が得られている。

最後にこれら一連の機器製作および実験に協力下さった港湾局機材課、第三港湾建設局を始めとする関係者各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 小岩苔生他：電磁波による岩盤の破碎—局部加熱の効果と熱破碎—(港研報告第14巻第3号, 1975.5)
- 2) 小岩苔生他：電磁波による岩石破碎実験装置の試作(港研資料No. 196, 1974.12)
- 3) 五洋建設技術研究所：マイクロ波による岩盤破碎について(五洋建設技術研究所報告75-OA-54)
- 4) 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, 1970.6)
- 5) 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, 1968.3)
- 6) 中村等他：高周波加熱(恒星社厚生閣 昭和39年)
- 7) 鉄道技術研究所：国鉄における岩石標準試験法案(鉄道技術研究報告, No. 668 (施設編第287号), 1969.1)
- 8) 日本鉱業会, 岩石強度測定法特別委員会：岩石強度測定法実施基準案(日本鉱業会誌Vol. 84, No. 965)

記号表

- C : 容量 (F)
- c : 比熱 (cal/g · deg)
- E : 電界強度 (V/m)
- f (f₁, f₂) : 周波数 (Hz)
- I (I₀, I₁, I₂) : 複素電流
- P (P₁, P₂) : 電力 (W)
- Q : 熱量 (cal)
- R : 抵抗 (Ω) またはシュミットハンマー反発度
- r : 半径 (cm)
- T (ΔT, ΔT_t) : 温度上昇 [deg]
- t : 時間 [s]
- tan δ : 誘電体力率
- V̇ : 複素電界強度 (V/m)
- V_p : 弾性波速度 [m/s]
- W : 誘電体損 [W]
- α : 線膨張率 [deg]
- γ : 単位体積重量 [kg f/m³]
- θ : 位相角 [deg]
- ε_r : 比誘電率
- η (η₁, η₂, η₁', η₂') : 効率

- θ : 位相角 [deg]
- π : 円周率
- ω : 角周波数 [Hz]

付録：加熱原理

マイクロ波による加熱は誘電加熱と呼ばれ岩石の様に誘電体とみなせる物質に作用する。

図-A.1 に示す様に単位長さ当り V̇ (V/m) の電界が



図-A.1 誘電体に働く電界

誘電体に作用すると、流れる電流 I_p は、この誘電体を理想的コンデンサとみなした時の変位電流 I₁ と、誘電体が理想誘電体ではなく損失を有するために流れる損失電流 I₂ のベクトル和を与えられる。ここで C を理想コンデンサとみなした時の等価容量、R を等価抵抗であるとし、印加されている電界の角周波数を ω (= 2πf)、ただし f は周波数、π は円周率、で表せば、

$$I_1 = j \omega C \dot{V} \dots\dots\dots (A, 1)$$

$$I_2 = \frac{1}{R} \dot{V} \dots\dots\dots (A, 2)$$

となるので全電流 I₀ は

$$I_0 = I_1 + I_2 = (\frac{1}{R} + j \omega C) \dot{V} \dots\dots\dots (A, 3)$$

で与えられる。

ここで比誘電率を ε_r とし、真空中の容量を C₀ とすると、

$$I_0 = j \omega C_0 (\epsilon_r - j \frac{1}{\omega C_0 R}) \dot{V} \dots\dots\dots (A, 4)$$

となる。

図-A.2 に示す様に被加熱物中を流れる電流 I₀ と印加電圧 V̇ の間の位相角を θ とすれば、単位時間に発生する熱量すなわち誘電体損 W は、

$$W = V I_0 \cos \theta \doteq \omega \epsilon_r C_0 V^2 \cos \theta [W] \dots\dots\dots (A, 5)$$

となる。

また変位電流 I₁ と全電流 I₀ との間の位相角を δ とすると明らかに

$$\theta + \delta = \frac{\pi}{2} \dots\dots\dots (A, 6)$$

であり、誘電体損失角と呼ばれるこの δ は誘電体では一般に小さな値をとるから

$$\cos \theta = \cos (\frac{\pi}{2} - \delta) \doteq \sin \delta \doteq \tan \delta \dots\dots\dots (A, 7)$$

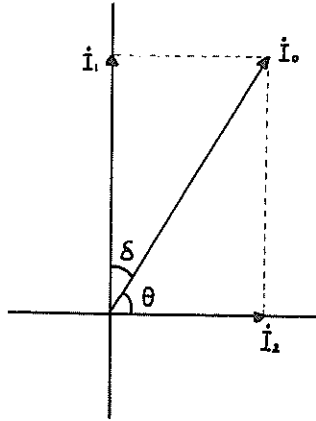


図-A.2 誘電体を流れる電流

となり，従って (A, 5) 式は

$$W \doteq \omega \epsilon_r C_0 V^2 \tan \delta [W] \dots\dots\dots (A, 8)$$

となる。ここで $\tan \delta$ は誘電体力率と呼ばれている。

港湾技研資料 No. 313

1979. 3

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 株式会社 東京プリント

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