石灰石鉱山における穿孔機の適用性の評価*

島田 英樹¹ 江口 元² 松井紀久男³

Estimation of Applicability of Drilling Machine in Limestone Quarry

by Hideki SHIMADA¹, Gen EGUCHI² and Kikuo MATSUI¹

1. Faculty of Engineering, Kyushu University, Higashi-ku, Fukuoka 812-81
2. Kajima Corporation Ltd.

In Japanese open pit limestone quarries, the drill and blast method using the bench cut system is employed. Since the success of drilling machine is more sensitive, its application should be made after proper evaluation of geological conditions and rock characteristics in order to predict the machine performance and bit consumption and so on. Geological conditions have a significant effect on the performance of drilling machine. Unconfined compressive strength or unconfined tensile strength of intact rock which is used as an index for criterion or prediction is not good because the fragmentation mechanism is not considered well. It is more important to consider the consumed energy value in fragmentation such as the rock impact hardness number (*RIHN*) than the strength failure value such as the unconfined compressive strength or the unconfined tensile strength for criterion or prediction of machine performance.

From these points of view, this paper discusses the predicting method of the drilling rate and the selecting method of the drilling machine by using the rock impact hardness number, *RIHN*.

KEY WORDS : Limestone Quarry, Drilling Machine, Rock Impact Hardness Number (*RIHN*), Drilling Rate, Applicability

1. 緒 言

わが国の石灰石鉱山では、主にベンチカット穿孔・発破工法による採掘が行われており、各種作業の効率、経済性、安全性のみならず、作業環境や人的問題を考慮して、さらに一層の機械化、自動化、省力化が要求されている。そこで作業の合理化や生産コストの削減を図るために、高能率の大型穿孔機が多数導入され、穿孔能率は飛躍的に増大している。一方、ここ数年鉱山周辺の都市化が進み、発破振動や騒音、飛石などの環境・保安問題で発破による採掘作業が大きく制限されつつある現状から、これらの問題に対処するために無発破による破碎工法等の研究開発¹⁾²⁾も試みられている。しかし、現時点では無発破採掘システムが十分に確立されていないことやこの導入に伴う多大なコスト等を総合的に考慮すると、この工法を即採用できるといった状況ではないため、今後も現行の穿孔・発破による採掘がかなりの割合を占めると思われる。

穿孔・発破採掘の方法としては、穿孔、装薬、発破の順に行われ、この中でも穿孔作業が中心的な位置を占めている。したがって作業効率や生産性を向上させるためには、穿孔機導入の際、能

力を十分発揮する機種を選択、すなわち穿孔機の適用性を評価、把握する必要がある。穿孔機の導入を決定づける要因として、現場の地質状態や地山岩石のインタクトな状態における力学特性、導入が予定されている機械の特性等を挙げるができる。しかし、これらを総括的に考慮した精度の高い穿孔能率の予測や穿孔機の機種の選定をも含めた穿孔機の適用性についての汎用的な指針が未だ十分に得られていないのが実状である。穿孔の原理としては、ビットに衝撃を与え、岩石を打撃することにより穿孔が行われる打撃式穿孔、ビットに押し付け力を与えた回転により穿孔が行われる回転式穿孔およびビットに衝撃力と回転力を与えることにより穿孔が行われる回転・打撃式穿孔の3種類があり、いずれの穿孔方式でも対象岩石に外力を与え、新しい自由面の形成にエネルギーが費やされることにより穿孔破碎が行われる。したがって、穿孔機の適用性を評価するためには、穿孔機を用いる際の石灰石の破碎しやすさの程度すなわち穿孔性に影響を及ぼす要因を把握し、穿孔能率や穿孔速度を予測する必要がある。

筆者らは既に岩石の破碎特性あるいは掘削破碎効率を定量的に評価できるインデックスとして、衝撃破碎試験より得られる *RIHN* (岩石衝撃硬度数) が有用であることを報告した³⁾。また、*RIHN* が岩石の掘削破碎効率と密接に関連する穿孔性をも定量的に評価できるインデックスとなり得ることも明確にした⁴⁾。そこで本論文では、穿孔機の適用性を評価するために、まず石灰石の破碎性、平均粒径等が穿孔性にどのように影響を及ぼすのかについて検討し、次に岩石の破碎性を定量的に評価できる *RIHN* を用いた穿孔能率や穿孔速度の予測式の導出手法について言及する。そして最後に、穿孔機の適用性評価の指針について述べる。

* 1994年8月29日受付 11月28日受理 資源・素材学会平成6年度春季大会(1994年3月)にて一部発表

1. 正会員 工博 九州大学助手 工学部資源工学科

2. 鹿島建設(株)

3. 正会員 工博 九州大学教授 工学部資源工学科

(著者連絡先) FAX 092-641-4603 (九大・資源)

キーワード: 石灰石鉱山, 穿孔機, 岩石衝撃硬度数 (*RIHN*), 穿孔速度, 適用性

Fig. 1 Apparatus of the impact hardness test.

2. 室内試験、供試岩石および現場実績データ

今回用いた衝撃破砕試験装置は Fig. 1 に示すように、岩石供試体を入れる円筒容器の直径が 76 mm、落下させる重錘は質量 2.4 kg、直径 66 mm であり、Protodyakov 試験装置とほとんど同じである。衝撃破砕試験の試験手順は既報³⁾で述べたのでここでは省略する。

試験に供した試料は 9 産地の石灰石であり、このほか比較のために大理石、花崗岩、安山岩および砂岩を用いた。Table 1 にこれらの力学的性質および *RIHN* を示す。

岩石の穿孔性を求めるための穿孔試験には、Fig. 2 に示すようにストローク 200 mm、回転数 260 rpm で打撃数が毎分 2,100 回の能力を有する回転一打撃式穿孔試験装置を用いた。供試体は、岩石試料下部をセメントにより固定したものであり、その寸法は 30 cm × 30 cm × 20 cm である。なお、ビットは直径 26 mm のボタンビットを使用し、15, 20, 25 および 30 kgf の 4 種類の押し付け力で試験を行い、各押し付け力による穿孔速度を測定した。

次に、供試岩石の平均粒径を測定するために、薄片を作製し偏光顕微鏡を用いて観察した。薄片の作製は、岩石試料からロックコアリングドリルで直径 25 mm のコアをくり抜き、湿式カッターで厚さ約 5 mm に切断し、その後岩石試料中の結晶粒子を偏光顕微鏡で観察できる厚さ (0.03~0.05 mm) まで研磨した。そして、結晶粒子の平均粒径 d (mm) は、偏光顕微鏡で薄片を観察しながら、あらかじめ準備した測線を横切る結晶粒子の長さの総和 ΣL と、その測線を横切る結晶粒子数 Σn を測定して次式により求めた。

$$d = \frac{\Sigma L}{\Sigma n} \quad \dots\dots\dots (1)$$

なお、測線の全長は 62.5 mm である。Table 2 に試験に供した石灰石および大理石の平均粒径を示す。

さらに、実績データとしては、穿孔ビット径 B (mm)、純穿孔速度 PR_n (m/h)、総穿孔速度 PR_g (m/h)、起砕量 P (t/hole) および起砕能率 DP_g (t/h) である。これらのパラメータは下式により求めた。

$$PR_n = \frac{L}{T_1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Table 1 Mechanical properties and the *RIHN* of the rocks.

Rock type	S_c (kgf/cm ²)	E_{50} ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	S_t (kgf/cm ²)	H_s (-)	<i>RIHN</i> (-)
sandstone	650	5.5	44	40	9
granite	1,500	14.1	83	80	30
andesite	880	10.1	78	51	25
marble	500	7.7	32	38	10
limestone (A)	620	11.2	55	48	44
limestone (B)	1,050	13.7	62	45	37
limestone (C)	270	5.7	28	39	17
limestone (D)	1,290	14.0	81	48	50
limestone (E)	1,090	13.4	56	51	43
limestone (F)	800	11.7	65	46	46
limestone (G)	860	11.7	70	46	46
limestone (H)	920	13.2	65	50	40
limestone (I)	670	13.2	49	43	10

S_c : Unconfined Compressive Strength, E_{50} : Tangent Young's Modulus at 50 % of Unconfined Compressive Strength, S_t : Tensile Strength from Brazilian Test, H_s : Shore Hardness, *RIHN*: Rock Impact Hardness Number

Fig. 2 Apparatus of the drilling test.

Table 2 Grain size of limestones and marble.

Rock type	d ($\times 10^{-2}$ mm)
limestone (A)	6.8
limestone (B)	1.8
limestone (C)	422.0
limestone (D)	6.2
limestone (E)	2.3
limestone (F)	1.1
limestone (G)	1.0
limestone (H)	8.0
limestone (I)	45.2
marble	273.9

$$PR_g = \frac{L}{T_1 + T_2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$P = \rho \cdot H \cdot W \cdot S \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$DP_g = P \cdot PR_g / h \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 L は総穿孔長 (m)、 ρ は密度 (kg/m³)、 H はベンチ高さ (m)、 W は最小抵抗線 (m)、 S は孔間隔 (m)、 h は 1 孔

当たりの穿孔長 (m/hole) である。また、 T_1 および T_2 はそれぞれ穿孔に要した時間、穿孔機の移動やロッドの継ぎまし等に要した時間である。ただし、これらのパラメータは各石灰石鉱山で実際に用いられている発破規格より算出した。また、石灰石の密度は $\rho = 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 一定とした。

3. 穿孔に影響を及ぼす要因について

3・1 押し付け力および RIHN と穿孔速度の関係

まず、穿孔試験を行った結果得られた代表的な岩種に対する押し付け力と穿孔速度 PR の関係を Fig. 3 および Fig. 4 に示す。これらの図より、まず穿孔速度は押し付け力とともに増大するが、砂岩では押し付け力が 20 kgf あたりで、石灰石では 25 kgf あたりで穿孔速度の増加率が小さくなり、さらに押し付け力を増大させても、穿孔速度は増大せずほぼ一定の値をとる傾向にあることが分かる。これは、押し付け力を増大させてゆくと、岩石内部により多くの亀裂が発生し、穿孔破砕によって生じる緑り粉の除去能力を越えてしまい、結果的に穿孔速度が増大しないものと考えられている。このような状態に至ると、穿孔ビットの岩石への食い込みによる穿孔の停止、あるいは穿孔ビットの破損や、ビットに作用する摩擦力の増大によるビットの摩耗量の増加、あるいはビットに発生する熱によるビットの疲労や微小亀裂の発生によりビット寿命の著しい低下をもたらすと言われている。したがって、最適な押し付け力を知ることは、良い穿孔破砕効率を得る上で極めて重要であると考ええる。

次に、石灰石の破砕性と穿孔速度の関係について検討する。Fig. 5 に 15 および 20 kgf の押し付け力を作用させた場合の石灰石および大理石の $RIHN$ と穿孔速度 PR の関係を示すが、この図より $RIHN$ と穿孔速度の間には負の相関があり、岩石の破砕

Fig. 3 Relation between the thrust and the drilling rate, PR for sandstone.

Fig. 4 Relation between the thrust and the drilling rate, PR for limestone.

Fig. 5 Relation between the $RIHN$ and the drilling rate, PR .

性が大きいほど、すなわち $RIHN$ が小さいほど穿孔速度が大きくなることが認められる。このことから、石灰石、大理石の場合、同一の押し付け力であれば、破砕しやすい岩石の方が大きな穿孔速度を得ることができると考えられ、穿孔速度は石灰石が本来有する破砕性に影響されることが分かる。

3・2 平均粒径と穿孔速度および能率の関係

穿孔速度や能率は、基本的には先述の破砕性はもちろん、穿孔の対象となる岩石の組織、構造等の岩石学的特性値や岩盤特性値である亀裂の分布状態等にも大きく依存していると考えられる。そこで、石灰石の穿孔性に影響を及ぼすもうひとつの要因として、石灰石の平均粒径を取り上げる。石灰石は化学的にはほぼ同じ組成であるにもかかわらず、前掲 Table 2 に示すように構成鉱物の粒径は産地により大きく異なり、今回試験に用いた石灰石の平均粒径の差異は最大で 400 倍以上にもなる。Fig. 6 に平均粒径 d と穿孔速度 PR の関係を示す。この図より、平均粒径 d と穿孔

Fig. 6 Relation between the grain size, d and the drilling rate, PR .

Fig. 7 Relation between the grain size, d and the $RIHN$.

速度 PR の間には正の相関が認められ、平均粒径の大きな岩石ほど、より大きな穿孔速度が得られる傾向にある。そこで、平均粒径 d と $RIHN$ の関係を Fig. 7 に示す。この図から平均粒径の大きな岩石は $RIHN$ が小さいということが分かる。このことは、平均粒径が大きいほど破碎されやすく、その結果平均粒径の大きな石灰石ほど大きな穿孔速度が得られることを意味している。破壊に至る過程としては、主に粒界破壊と粒内破壊があるが、平均粒径が小さい場合、穿孔によって生じた多数の亀裂は、主に結晶粒子間に進展する粒界破壊を引き起こし、粒内破壊にまで至らないと考えられる。一方、平均粒径が大きい場合、粒界破壊に加えて結晶粒子内に亀裂が進展することにより生ずる粒内破壊も引き起こしていると思われる。

次に、粒径の相異に依存した破壊形態の穿孔速度に及ぼす影響について検討する。穿孔破碎は、穿孔ビットに押し付け力を与え、穿孔対象岩石中の結晶粒子間の結合力を破断し、新しい表面が形成されることにより生ずるものである。ここで、破碎に費やされたエネルギーが同じならば、岩石中に同程度の新表面積が形成されると仮定する。このような場合、主に粒界破壊が卓越した平均粒径の小さい岩石の穿孔では、平均粒径程度の破碎産物以上のものは生じないと考えられる。一方、平均粒径が大きい場合には、粒界破壊に粒内破壊も伴うため、同程度の新表面積が形成されていても破碎産物の体積は平均粒径が大きい場合の方が大きいと思われる。したがって、平均粒径の大きな岩石ほど大きな穿孔速度が得られたと考える。

以上のことから、穿孔の対象となる石灰石の破碎性は平均粒径に大きく影響され、結果的に穿孔能率は平均粒径に影響されることが分かる。また、石灰石のようにほぼ同じ組成をもつ岩石では、 $RIHN$ をもって平均粒径の違いを推定することも可能であると考える。

4. 穿孔機の適用性の評価

4・1 穿孔機の使用状況

穿孔機種選定時の穿孔機の適用性の評価には、生産コストを左右する起砕量や起砕産物の粒度等を考慮した発破規格をはじめ、機種特性の長短所についても十分検討、把握する必要がある。そこで、代表的な石灰石鉱山の実績データを集計、整理し、機種選定時の指針のひとつとなる穿孔機の使用状況について検討した。

いま述べたように、穿孔機の適用性や生産性等を考慮する場合には、穿孔速度と発破による石灰石の破碎量を併せて議論すべきである。そこでまず、穿孔ビット径 Bd と起砕能率 DP_g の関係を Fig. 8 に示す。ただし、起砕能率は前掲(5)式で示されるように穿孔速度と破碎量を考慮したパラメータであり、単位時間当たりの破碎量を意味している。また、これらの穿孔ビットにはボタンビットが用いられている。この図より、ビット径が増大するにつれて起砕能率が増大する傾向にある。ビット径の大小は各採掘現場の発破規格により定められているが、使用されるビット径により穿孔機の適用性や生産性が大きく影響されることは明らかである。次に機種別にみると、ロータリドリルが用いられている現場で最も高い起砕能率が得られている。Fig. 9 にはビット径 Bd と純穿孔速度に対する総穿孔速度の割合 PR_g/PR_n の関係を示す。この図より、ロッドの継ぎ替え等のロスが小さくて済むように改善された大口径のロータリドリルは、純穿孔速度に対する総穿孔速度の割合が大きくなっていることが分かる。

以上のことから、大口径のロータリドリルによるベンチ発破採掘では高い生産性が得られるため、石灰石の穿孔には最適であると思われる。また、この機種は孔壁の仕上がり状態が他に比べて

Fig. 8 Relation between the diameter of the drilling bit, Bd and the characteristics of fragmentation after blasting, DP_g .

Fig. 9 Relation between the diameter of the drilling bit, Bd and the ratio of the gross drilling rate to the net drilling rate, PR_g/PR_n .

良好であり、騒音も比較的小さいという長所もある。しかし、周辺環境に制約がある場合や、生産品のサイズ等により、それに応じた発破規格が計画されるため、穿孔径や使用機種が制限される。また、一般的に生産性の高いロータリドリルはビットの摩耗が他の機種に比べて大きいという報告があり⁵⁾、このような場合にはダウンザホールドリルやクロラドリルを補助的に用いた生産が必要である。したがって、使用する穿孔機の穿孔能率や発破規格、孔壁の仕上がり状態、破碎産物のサイズなど、多角的に考慮した穿孔機の機種選択は非常に重要な課題であることが分かる。

4・2 穿孔速度および能率の予測

前節の結果を踏まえて、穿孔能率の予測式の導出についての検討を行う。先に述べたように、精度の高い穿孔能率の予測式や穿孔機の機種の選定についての汎用的な指針は未だ十分に得られていない。これは穿孔能率の予測や機種の選定パラメータとして、岩盤の基本的な強度特性値、すなわち穿孔対象岩石の一軸圧縮強度のみを用いてきたことに起因していると考えられる。この強度特性値は、一定の形状に整形した供試体に軸方向にのみ圧縮力作用させ、その供試体が支持し得る最大の応力をもって定義されるものであり、岩石の破碎性を十分に記述するものとはなっていない。これに代わるものとして、筆者らはこれまで掘削能率の予測や機種の選定についての検討の際には $RIHN$ を利用してきた⁶⁾。また、詳細は既報⁶⁾に譲るが、 $RIHN$ が穿孔性をも定量的に評価できるインデックスとなり得ることをも示した。そこで $RIHN$ を用いた簡便な穿孔速度の評価法として、Rabiaら⁷⁾が提案した次のような経験式をもとに穿孔速度予測式の導出を試みる。

Fig. 10 Relation between the drilling rate and the parameter which obtained from the regression analysis.

Fig. 12 Relation between the drilling rate and the parameter which obtained from the regression analysis (the Shore hardness is deleted from the equation (6)).

Fig. 11 Relation between the RIHN and the Shore hardness, H_s .

$$PR = C \frac{P^a}{(RIHN \times H_s)^b} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 C 、 a および b は使用する穿孔機や実験条件により決まる実験定数であり、 P 、 H_s はそれぞれ作動ゲージ圧とショア硬度数である。彼らは、穿孔速度や穿孔能率の予測あるいは穿孔機種種の選定には、機械特性パラメータとして作動ゲージ圧を採用しているが、ここでは作動ゲージ圧の代わりに穿孔試験により得られる押し付け力を用いた。

先に述べたように、穿孔能率は押し付け力と破砕性に影響が及ぼされることが確認された。そこで、これらの結果をもとに(6)式に従い穿孔速度、押し付け力、 $RIHN$ およびショア硬度数を用いて重回帰分析を行った結果得られる関係をFig. 10に示す。この図に見られるように、かなりのバラツキが認められる。また、前掲(6)式にはショア硬度数が含まれているが、これは穿孔の際、岩石表面の硬度が大きいほどより大きな押し付け力を必要とし、押し付け力の不足による穿孔能率の低下を考慮したことによると思われる。ここで、 $RIHN$ とショア硬度数の関係を見るとFig. 11に示すようであり、両者の間にはかなり強い正の相関が認められ、 $RIHN$ とショア硬度数は互いに依存していると考えられる。したがって、岩石表面の硬度の押し付け力への影響は $RIHN$ によって評価することができるため、(6)式からショア硬度数を削除しても穿孔速度の予測には影響しないと思われる。

これらの結果をもとに、(6)式からショア硬度数を削除して重回帰分析を行った結果をFig. 12に示す。この図より重回帰分析を行って得られた予測式は、相関係数 r が0.57とあまり良くない。そこで、穿孔特性曲線を模式的にFig. 13のように表すと、穿孔特性曲線は、

① grinding phase (A-B間)

Fig. 13 Schematic curve of the drilling characteristics.

② cutting phase (B-C間)

③ clogging phase (C-D間)

の3段階に分けられる⁵⁾。ここで、①は押し付け力不足による穿孔ビットの摩耗が著しい段階、②は適切な押し付け力により効果的な穿孔が行われる段階、③は繰り粉の除去能力の限界に達し穿孔作業の停止に至る段階である。このように、押し付け力の与え方により岩石の破砕に費やされるエネルギーの割合が大きく異なるため、①～③のすべての穿孔結果を用いたFig. 12の相関性があまり良くなかったと考える。したがって、押し付け力を穿孔速度の予測パラメータとして用いる場合には、上述の点を十分留意する必要がある。すなわち、押し付け力を予測パラメータに利用する場合、穿孔対象岩石の穿孔特性を明確に表現する値を選択すべきである。この観点から、与えたエネルギーが最も効果的に破砕に費やされる段階、すなわちFig. 13の②の段階のデータを予測パラメータとして用いることにする。Fig. 14に、穿孔試験結果から図中の②のデータのみを用いて再度重回帰分析を行った

Fig. 14 Relation between the drilling rate and the parameter which obtained from the regression analysis (where the thrusts are used the data in cutting phase).

結果を示す。この図よりデータ選択の効果が顕著に現れ、かなり強い正の相関が認められることが分かる。したがって、穿孔速度の予測式は次式となる。

$$PR = 4.3 \left(\frac{P}{RIHN} \right)^{0.3} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、室内試験に用いた穿孔機はクロードリルの機構と類似しており、また打撃式穿孔機と回転式穿孔機あるいは回転-打撃式穿孔機の穿孔速度は互いに強い正の相関があることが示されているため⁸⁾、上式をクロードリル以外の他の機種に対しても十分利用できると思われる。なお、(7)式は室内穿孔試験により得られた結果であり、これの実現場への適用の際には、使用穿孔機のスケールリングファクタについての検討を要する。また、実際の穿孔作業では岩盤の亀裂状態や貫入岩の影響についても考慮しなければならない⁹⁾。今回は穿孔速度予測式の現場への適用についての検討は行っていないが、現場に適用する場合、これらの影響係数を(7)式に加味する必要があると思われる。

以上の結果より、穿孔速度や穿孔能率の予測には、まず実際の穿孔機種の破碎機構を考慮した室内試験により、各種機械パラメータが穿孔破碎特性にどのような影響を及ぼしているかについて把握し、得られた結果より現場試験におけるパラメータを選択する。そして、上述の手法により予測式を導出し、穿孔速度や能率を予測すれば良いと考える。ただし、穿孔能率を論ずる場合、使用する機種の穿孔特性や穿孔ビットの摩耗量、純穿孔能率を向上させるために必要な作業環境の改善方法等についても考慮する必要がある。

最後に、石灰石鉱山における穿孔機の機種選定の指針について述べる。これまで、穿孔速度や能率の予測には、機械パラメータと岩盤パラメータが含まれた(6)式により可能であることを述べてきた。この方法は、比較的簡便であり測定データを増やすことにより現場に十分利用できるものである。そこで、前述の手法により得られる予測式をもとに穿孔機の機種選定の指針について述べる。Fig. 15に以下の3つのステップからなる機種選定の指針を示す。

ステップ1：穿孔能率に影響を及ぼす要因の検討

ステップ2：穿孔能率予測式の導出

ステップ3：仮想起砕量とコストの比較による最適機種の選定

まず、ステップ1では、現場試験により各種機械パラメータおよび岩盤特性パラメータが穿孔特性にどのような影響を及ぼしているかについて把握し、穿孔速度の予測に用いるパラメータを選

択する。すなわち、岩石の破碎特性値である *RIHN* や岩盤の亀裂密度等と穿孔速度の関係、穿孔機の作動ゲージ圧と押し付け力の関係等を検討する。次に、ステップ2ではステップ1で得られた結果をもとに上述の手法により予測式を導出し、穿孔能率の予測を行う。そして、最終段階であるステップ3では、導出した予測式より得られる仮想の穿孔実績と採用されている発破規格より、仮想の起砕量を算出し、これと計画において要求される採掘量を比較する。この過程を採用想定機種毎に繰り返し、要求される採掘量を満足するのみでなく、コスト的にも優れるものが最適機種となる。

これまで、穿孔機種の選定についての汎用的な指針が十分得られてなかった一因として、前述した予測パラメータの問題以外に穿孔機種毎の詳細な実績データの収集に費やされるコストや時間の問題が挙げられる。しかし、穿孔中に計測した情報をリアルタイムで採取する技術¹⁰⁾等が今後ますます発達していく可能性が高いことから、将来的には穿孔機種選定の系統的な指針をも確立できると思われ、今後も検討していく予定である。

5. 結 言

本論文は、石灰石鉱山における穿孔機の適用性を評価するために、まず石灰石の破碎性、平均粒径等が石灰石の穿孔性にどのように影響を及ぼすかについて検討し、次に穿孔速度や能率の予測式の導出方法、穿孔機の適用性の評価指針について検討した。

その結果、まず最適な押し付け力を知ることが良い穿孔能率を得る上で重要であることを明らかにした。また、平均粒径も穿孔能率に大きく影響を及ぼし、平均粒径が大きいほど、大きな穿孔速度が得られることが分かった。

次に、現在行われている穿孔・発破工法で使用する穿孔機の適用性判断の指針の構築の一步として、室内試験結果から穿孔能率の予測式について検討した。その結果、Rabiaらの実験式をもとにした穿孔速度予測式と起砕能率を検討することにより、穿孔機の適用性や生産性を評価できる可能性があることを明らかにした。

謝辞 石灰石および現場実績データ採取に当たっては石灰石鉱山関係各位に、穿孔試験を行うに当たっては三菱マテリアル(株)中央研究所の関係各位に多大なるご理解とご協力を賜ったことに深甚なる感謝の意を表する。また、本研究に当たり、当資源工学科の一ノ瀬政友博士にご助言、ご検討をいただいたことに謝意を表する。さらに、本研究の一部は、石灰石鉱業協会研究奨励金によって行ったことを付記し、感謝の意を表する。

引 用 文 献

- 金子勝比古・西田 稔・稲葉 力・山内 清：資源と素材，Vol. 107, p. 959-964, (1991)
- 本田裕夫・萩森健治・古川浩平・中川浩二：土木学会論文集，379/IV-6, p. 247-256, (1987)
- 島田英樹・松井紀久男・一ノ瀬政友：資源と素材，Vol. 108, p. 402-406, (1992)
- Matsui, K. and Shimada, H.: Proc. of 2nd Symposium on Mine Mechanization and Automation, p. 265-270, (1993)
- Clark, G. B.: Principles of Rock Fragmentation, p. 154-217, John Wiley and Sons, (1987)
- 島田英樹・松井紀久男：資源と素材，Vol. 110, p. 499-503, (1994)
- Rabia, H. and Brook, N.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 18, p. 211-219, (1981)
- Howarth, D. F. and Adamson, W. H.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 25, p. 25-33, (1988)
- 室 達朗・深川良一・渡邊公浩：第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，p. 471-475, (1987)
- 例えば、唐澤廣和・大野哲二・三澤茂夫：資源・素材学会平成6年度春季大会講演要旨集，p. 25-26, (1994)

Fig. 15 Flowchart of the selecting method of the drilling machine.