

ノーベルドリリング(Novel drilling)

(その1)

河内 英幸・加藤 完

地下資源の探査や採掘のためあるいは一般地質調査や発破孔のために 地中に多種多様の孔があげられているが その方法として現在下記のような各種のボーリング法 さく井法 さく孔法が行なわれていることはよく知られていることである。

(iii) 融解と蒸発作用を利用する方法
電気ヒータードリル 核分裂ドリル 電弧ドリル プラズマドリル 電子光線ドリル レザードリル

(iv) 化学反応を利用する方法
フッ素を主剤としたドリルなど

機械的にストレスを誘起させる方法とは衝撃 切削 浸蝕などによって生じた力を利用する方法で これらの力が岩石の抗張力 剪断力を越えるような場合には岩石に砕けやすい亀裂が生じたり 可塑性の岩石に変形するものである。 衝撃力はパーカッションの衝撃 内破(impllosion) 爆破(explosion)などの爆発力および水中スパークのショックによって発生する。 切削力は現在使われているダイヤモンドとかタングステンカーバイドのような硬い物質の駆使によって生ずる。 また浸蝕力は砂やその他の研磨材あるいは水をジェットさせることによって発生するもので これには砂などを使用する低速の研磨ジェット(10~200m/秒)と 水を利用する高速の浸蝕ジェット(200~1,000m/秒)とがある。

熱でもってストレスを誘起させる方法とは 岩石に熱を加えて亀裂を発生させたり 岩石を砕く方法である。 岩石の亀裂はその構成物質の異なった熱膨脹係数によって熱応力を発生し 亀裂を生じるのである。 この異なった熱膨脹の生ずるおもな要因は 岩石に加えられた温度勾配 鉱物間の異なった熱膨脹係数 鉱物の相変化 結晶水の移動 含水・含ガス成分の膨脹・集合体の崩壊を起こさせる化学作用などである。 多くの岩石の表面は急速に熱せられると薄い層が表面から剥げていく。 この現象を温度剝離と呼んでいる。 剝離された小片の寸法と形状は岩石に応じた温度勾配によってコントロールすることができる。

融解と蒸発作用を利用する方法とは文字のごとく岩石に熱を与えて融解し さらに加熱を続けてそれを蒸発させ 岩石に孔をあける方法である。 大部分の岩石を融解するのにだいたい4,000~5,000ジュール/cm³の比エネルギーが必要である。 砂岩や石灰岩のような堆積岩を融解するよりも 花崗岩や玄武岩のような火成岩を融解する方が 比エネルギーが少なくすむという興味ある報告もしている。 また融解させる熱量と蒸発させる熱

- 回転式
 - スピンドル型: 探鉱試錐機など
 - ロータリー型: 石油さく井機など
 - その他の型: トンネル掘さく機 ターボドリル・エレクトロドリルなど
- 衝撃式
- 打撃・回転式: さく岩機など

ここに紹介するのは 上記方法のように機械的に岩石を砕いたり切削するのではなく 今までのとは異なった手段を用いてさく孔する方法であって これらの特殊工法を総称してノーベルドリリングといている。 この文献は ESSO 会社の探査主任である William C. Maurer 博士によってまとめられたものであるが その全訳をここに掲載することは 紙面その他の事情で困難であるので その骨子のみを摘録してボーリング関係者のご参考に供する次第である。

1. ノーベルドリリングの分類

下記分類のうち初期の火焰ドリルは 1853年(嘉永6年)に また初期の電弧ドリルは1874年(明治7年)にそれぞれ特許がとられているという事実からみても これらの方法のうちの一部は概念的にはすでに古いものになっている。 しかしその後も 岩石を破壊するためにあるいは孔をあけるために 色々の特殊工法が研究されてきている。 これらの工法を分類すると下記のように基本的には4つの機構に分けている。

- (i) 機械的にストレスを誘起させる方法
タービンドリル ベレットドリル 連続ペネトレーター 内破ドリル スパークドリル 放電水圧クラッシュ 発破ドリル 浸蝕ドリル
- (ii) 熱でもってストレスを誘起させる方法
ジェット貫通ドリル 強圧火焰ドリル 電気分解ドリル テラ・ジェッタードリル 高周波電気ドリル 超短波ドリル 電気誘導ドリル

第1表 常気圧下における一般試錐工法の代表的掘進能率

ドリル	平均孔径 (cm)	岩石に伝 わる力 (HP)	代表的掘さく能率(cm/分) *1				比エネルギー(ジュール/cm ³) *1			
			軟岩	中硬岩	硬岩	超硬岩	軟岩	中硬岩	硬岩	超硬岩
衝撃式										
ジャックハンマー	3.8	5	硬岩にのみ使用 される		75	50	—	—	260	390
ドリフター	4.8	9			120	80	—	—	180	270
発破孔	7.6	11			60	40	—	—	180	270
回転式(歙山関係)										
ローラービット	20	30	200	100	20	5	20	40	210	840
ドラッグビット	10	15	400	200	100	能率悪し	20	40	80	—
ダイヤモンドビット	5	10	使用されない		20	5	—	—	1,120	4,500
回転式(油田関係)										
ローラードラッグビット	20	30	50	10	5	2	80	420	840	2,100
ドラッグビット	20	50	100	5	使用されない		70	350	—	—
ダイヤモンドビット	20	20 ^{*2}	20	2	2	1	140	560	1,400	2,800
ジェット貫通式	20	160					—	—	—	1,500

*1 岩石の硬さの分類
圧縮強度(kg/cm²)
軟岩 0~500
中硬岩 500~1,000
硬岩 1,000~2,000
超硬岩 2,000以上

*2 出力は500~1,000HPであるが わずか100~200HPしか
岩石の掘さくに伝達されていない。

量とを比較すると 蒸発させる方がかなり多くのエネルギーを必要としている。たとえば 氷を融解するにはわずかに 80cal/g の熱量ですむのに 水を蒸発させるには 640cal/g も必要である。

また石英を融解させるには 450cal/g あればよいがこれを蒸発させるには 2,000cal/g 以上の熱量が必要であると述べている。このことは一定の出力に対して融解試錐は蒸発試錐に比べて よく早く掘さくできるということを示している。

化学反応を利用する方法とは フッ素やハロゲンのような激しい化学反応を起こす薬品を用いて 高能率の掘さくを行なう方法である。この方法は実験室において砂岩 石灰岩および花崗岩のさく孔に成功を収めている。しかしこの方法は 強烈な化学反応を起こす薬剤を多量に取り扱うというむずかしさ およびこれらの薬剤が高価であるということから応用面ではかなりの制限をうけるようである。

2. 現行の試錐法の成績と特性

新しい試錐方法を価値づけるために 現在実用に供している試錐作業の実情を知ることも必要であろう。第1表は軟岩 中硬岩 硬岩 超硬岩に対する回転式と衝撃式の代表的な掘進率と出力を示したものである。掘進率は圧縮強度ばかりでなく 岩石の可塑性や孔隙率によっても値が異なってくるが 第1表は現行の試錐方法とノーベルドリリング法の比較にはよい基準を与えるも

のと思われる。この表によると掘さくに必要な比エネルギーは一般的にみて 50~1,000ジュール/cm³の範囲であるが ダイヤモンドビットでは 岩石を非常に細かく砕くため多くのエネルギーを必要としている。現行の試錐法では切削機構が非常に能率的であるため ノーベルドリリングよりも少ないエネルギーでよいが 一方ノーベルドリリングの中には掘さくに多くの力を伝達することができるものもあるので

それらは現行の試錐よりも早く掘さくすることができるはずである。他面 石油・ガスなどのように井戸がますます深くなっていくにつれて 深度に応じた掘さくコストもかさばることも当然である。これは在来のローラービットやドラッグビットが15~20時間のビットライフであるし ダイヤモンドビットでも 50~200時間後には切れなくなるからである。そのたびにロッド昇降を重ねなければならず 1回の昇降に10~15時間を費やすことも普通である。また深くなるにつれて岩石に伝達される掘さく馬力は減少し 能率も悪くなり 循環泥水の掃孔能力も悪くなってカッティングの再粉碎という問題も起きてくる。これらの原因から掘さくコストは深くなるにつれて高くなっていくのは当然である。このような時点において 岩石に対して高いエネルギーを伝達することのできるノーベルドリリングの技術開発はおおいに注目に値するものである。

第2表は 岩石の硬さに対するロータリー式の掘進能率を示したものであるが 浅いうちは掃孔能力がすぐれているため 軟岩では硬岩の場合よりも10~50倍の能率を示している。しかし深度が深くなると軟岩はプラスチック状となり掃孔に困難性を増し かえって掘進率は悪くなっている。

3. 破碎と掘進率の方程式

機械的にあるいは熱によって誘起されたストレスで岩石を破壊に導くためには それらのストレスが岩石強度

第2表 ローター式の深度別掘さく能率

深 度(m)	代表的掘さく能率(m/時)			代表的比エネルギー(ジュール/cm ³)		
	軟 岩	中硬岩	硬 岩	軟 岩	中 硬 岩	硬 岩
0—2,000	15—50	5—15	1—5	50 — 170	170 — 510	510—2,600
2,000—4,000	10—30	4—10	1—4	85 — 260	260 — 640	640—2,600
4,000—6,000	6—20	2—6	1—2	130 — 430	430—1,300	1,300—2,600
6,000—8,000	1—2	1—2	1—2	1,300—2,600	1,300—2,600	1,300—2,600

(注) 圧縮強度(kg/cm²)
 軟岩: 500 以下 中硬岩: 500—1,000 硬岩: 1,000 以上

を越えるような十分な力あるいはエネルギーを岩石に与えなければならない。同様に岩石を融解するには岩石の融解温度を越えるような熱を局部的に加える必要がある。一たび力あるいはエネルギーがこの値を越えると岩石に亀裂を生じさせるが さらに岩石を破壊したり除去するのに必要な単位体積当りのエネルギー量はだいたい一定に近づくようである (Teale)。岩石破壊技術の効率についての1単位を示しているこのエネルギー変数はこの研究では比エネルギーとして定義されている。実験室における研究ではこのエネルギー変数がほとんど一定であるので この値は大型ドリルとか岩石破砕機の応用におおいに役立つであろう。

破 砕 方 程 式:

岩石の破砕比率 CR は次式によって求められる。

$$CR = P/E(\text{cm}^3/\text{分}) \dots (1)$$

P: 岩石に与えられる入力(ジュール/分)
 E: 比エネルギー(ジュール/cm³)

Bond 氏は比エネルギーが 次の関係式にほぼ近いことを証明する多くの岩石破壊データを集めている。

$$E = 10E_i(\sqrt{P} - \sqrt{f})(\text{ジュール}/\text{cm}^3) \dots (2)$$

第3表 岩石破砕のための代表的比エネルギー (ジュール/cm³)

岩 石	砕かれた岩片の大きさ		
	0.1 mm	1 mm	10mm
硝 子	30	10	3
砂 岩	110	35	11
石 灰 岩	110	35	11
ド ロ マ イ ト	110	35	11
珪 岩	120	38	12
石 英	120	38	12
花 崗 岩	140	45	14
頁 岩	150	48	15
タ コ ナ イ ト	180	57	18
玄 武 岩	210	67	21

提供: Bond

E_i: 巨大な大きさのものから100ミクロンにまで岩石を砕くのに必要な比エネルギー (ジュール/cm³)

f: 最初の粒子の大きさ(ミクロン)
 P: 最終の粒子の大きさ(ミクロン)

大半の粒子が細かく砕かれると (f ≧ P) (2)式は次のようになる。

$$E \approx 10E_i/\sqrt{P} \dots (3)$$

このように比エネルギーは粒子の平方根に反比例する。第3表は各種の岩石を破砕するのに必要な比エネルギーの代表的な値を示したものである。

掘 進 率 方 程 式:

掘進率Rは次式で示される。

$$R = P/AE(\text{cm}/\text{分}) \dots (4)$$

P: 岩石に伝達される力(ジュール/分)
 A: 孔の断面積(cm²)
 E: 比エネルギー(ジュール/cm³)

ドリルの出力のほんの一部が岩石に伝達されると 掘進率の方程式は 次のようになる。

$$R = ePo/AE(\text{cm}/\text{分}) \dots (5)$$

Po: ドリルの出力(ジュール/分)
 e: ドリルの岩石に伝達される力の効率

上記式(4)と(5)は実験室のテスト結果から掘進率の概算を得るために用いられるし 孔径の異なった孔の掘進率との関係を求めるためにも あるいは出力の異なったドリルとの関係を知るためにも役立つであろう。

4. ノーベルドリリングの各装置の概要

4 = 1 機械的にストレスを誘起させる装置

i) タービンドリル (turbine drills)

現在 ターボドリルという名称で すでに実用に供されている掘さく装置があるが これは掘さく泥水の流体エネルギーを利用してタービンを回転させ それに連なるタービン軸 さらにその先端についているビットに回転トルクを与えて地層を掘さくするものである。これに対してタービンドリルは第1図に見られるように ダイヤモンド粒の表面植込みしたホイールを回転させるために一段タービンを使用したもので さらにこの装置全

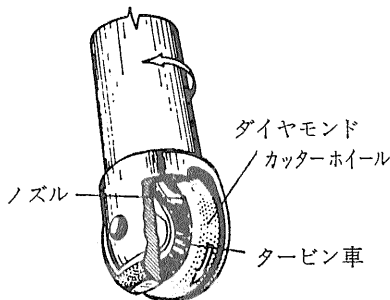
第4表 タービンドリルの運転性能

タービンの回転	5,000~10,000rpm
ドリルパイプの回転	30~75rpm
孔 径	20cm
タービンドリルにかかる全荷重	1,500~2,500kg
タービンホイールにかかるスプリング荷重	500~1,500kg
水 力	200~300HP
タービンの出力	≈20~60HP
タービンの効率	≈10~20%

(Cannon から)

体をドリルパイプを通して回転させる方法をとったものである。この装置はハンブル石油会社とクリステンセンダイヤモンド会社との共同研究によって開発されたもので昭和28年頃から油田におけるさく井で2~3の実験が行なわれている。掘さくに必要な給圧はカッタホイールのところにあるパネ仕掛けと一連のパイプ類の重量によって行なわれるのでリーマの部分でも掘さくが行なわれるようになってきている。上記のパネ仕掛けがあまり強く圧縮されすぎるとホイールの回転は止まるようになるし逆に軽すぎると失速するおそれがある。それ故パネ圧のかけ方すなわちロッド類の荷重のかけ方が問題となる。クリステンセン会社では種々の岩石に対するタービンドリルのトルクカーブを作っておいて現場における操作を容易にしている。またロータリードリルとタービンドリルとの掘さく能率について比較検討も行なっている。

これまでのタービンドリルの適用には自ら限界があるようであった。すなわち一段タービンでは10~20%の効率しかなくしかもわずか20~60HPの出力しか出せないからである。この出力はロータリードリルの出力と同じ位である。他方第1表によるとダイヤモンドビットはローラービットに比べてほぼ2倍の比エネルギーを必要としていることからタービンドリルはロータリードリルの約半分の掘進能率にしかならない。このようなことからタービンドリルの今後の開発は一段タービンの改良か多段タービンの使用に問題がしばられると



第1図 タービンドリル

第5表 ペレットドリルの運転性能

ピ ッ ト 径	23cm
回 転 速 度	20rpm
送 水 量	1,970 l/分
第1ノズル圧力降下	40.5kg/cm ²
第1ノズル径	2.2cm
第2ノズル径	8.9cm
ペレット径	3.2cm
ペレット供給量	65~85kg
衝 撃 比 率	140個/秒
衝 撃 速 度	23m/秒
水 圧 力	172HP
ペレット出力	6.4HP
水 力 効 率	3.7%

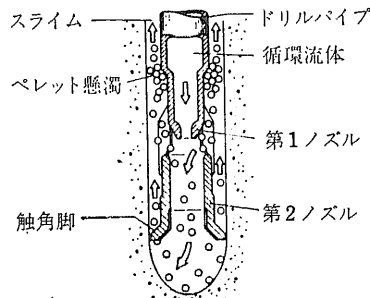
提供: Keckel 等

最後にこのドリルに関する研究は一般に不活発であり実用化にはほぼ遠いようであると結言している。

ii) ペレットドリル (pellet drills)

戦後わが国にダイヤモンドビットメーカーが設立されたがそれまでは硬岩の掘さくに対してショットボリングが広く用いられていた。このペレットドリルは広い意味ではショットボリングと同類である。この研究はカーター石油会社によって行なわれたもので研究目的はビットの磨耗の都度一々ドリルパイプを昇降させるようなことをせず掘さくに必要な cutting elements を次々と補給していく方法を開発するためであった。

第2図はペレットドリルの掘さく状態を示したものであり第5表は直径23cmの実験用ペレットの運転性能を示したものである。このドリルは32mm径の鋼球(ペレット)を140ヶ/秒の割合で補給している。循環泥水はドリルパイプから第1ノズルを通して送り込まれるのであるがその際ドリルの中にあるペレットを第2ノズルの中に押込むような吸引作用が働らくのである。ペレットは第2ノズルのところで23m/秒の早さに加速されその勢いで岩石を打ち砕くのである。ペレットと



第2図 ペレットドリル

砕かれた岩片とは第2ノズルの吸出口まで上昇泥水と一っしょに押し上げられるがその際泥水の4/5はドリルを通して再び循環させられ残りの泥水はドリルパイプの外側を通してスライムと一っしょに地表に排出される。

[以下 10頁下へつづく]