ロータリー掘さくの掘進率におよぼす泥水循環 の作用に関する研究

田 中 彰 一*

(昭和 43 年 1 月 17 日受理)

A Study on the Effect of Hydraulics on the Penetration Rate of Rotary Drilling

By

Shoichi TANAKA

Abstract The equations for the penetration rate reported by many researcher are applicable only under the condition of the adequate hydraulic action, i.e. clean bottom hole condition. But field drilling practices are in many case under the incomplete hydraulic condition. It is quite important to understand quantitatively the effects of hydraulics on the rock bit performance. The effects of hydraulics have been investigated from two standpoints: one is the maximum penetration rate attained under the adequate hydraulic action, other is the behavior of the penetration rate under the condition of the incomplete hydraulics. By drilling experiments by $1\frac{1}{4}$ in. two-cone microbits, three basic equations have been derived to describe the penetration rate in any hydraulic condition.

(1) The equation for a performance line. This was proposed by Bingham (1964-65). This is applicable under the complete hydraulic action.

(2) The equation for a branch-off-point penetration rate. When bit weight is increased with hydraulics maintained at the same level, the penetration rate branches off at a specific point on the performance line corresponding to the hydraulics level. Then, the penetration rate at the branch-off point is able to be used as a measure of the hydraulics effect. The relationship between them is affected by the properties of rock. When that relationship is obtained, it could be used to estimate the branch-off-point penetration rate for any level of hydraulics.

(3) The equation for a relative penetration rate. The relative penetration rate and the relative bit weight are defined as follows:
the relative penetration rate = R/R_0

R = penetration rate under the incomplete hydraulic condition

R_0 = penetration rate calculated by the equation for the performance line at the same bit weight and rotary speed,

the relative bit weight = $(W - W_c) / (W_b - W_c)$

W = bit weight

W_b = bit weight at the branch-off point

W_c = performance-line intercept.

By using these quantities the relationship between the penetration rate and the bit weight is described by a single equation, i.e. the equation for the relative peneetration rate which is not affected by rotary speed, hydraulics and properties of rock. The characteristics of the bit design and wearing, if any, are only factors that affect the form of the equation. A tentative equation for the relative penetration rate has been obtained by rearranging the Thompson's field data (1953). That is

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{13}{\frac{W - W_c}{W_b - W_c} + 12} \right)^{3.85}$$

* 東京大学工学部資源開発 (石油) 工学科

This equation would be applicable for analyzing and estimating the performance of any soft-type three-cone rock bit under the condition of the incomplete hydraulics.

ロータリ掘さくにおいては、泥水循環の作用が不足すると、ビットはりつきや掘屑の坑底残留が発生し、掘進率は低下する。泥水循環の作用を強化して行くと、初めのうちは掘進率は急激に増加するが、その増加の割合は徐々に低下し、一定値に達する。この一定値は与えられた岩石に対し、ビット荷重とビット回転数により定まる値で、泥水循環の値には無関係である。この状態を泥水循環の作用が十分である状態という。泥水循環の作用が不十分なところでは、掘進率はビット荷重およびビット回転数のほかに、泥水循環の値にも関係する。泥水循環の作用が十分なときの掘進率を表わす方法は、数多く発表されている(例えば Bingham, 1964-65)。現場における掘さく実績をみると、泥水循環の作用が十分なところで掘さくが行なわれていることは少なく、多くの場合は泥水循環の作用が不十分なところで行なわれている。したがって掘さく作業計画をたてるうえにも、また掘さく記録を解析するためにも、泥水循環の作用が不十分なところの掘進率を、定量的に表わす方法を確立することが必要である。掘進率におよぼす泥水循環の作用は、次の2つの面より研究することが必要である。

1. 泥水循環の作用が十分に行なわれる範囲の決定
2. 泥水循環の作用が不十分になってからの掘進率

以下この2つについて“掘進率におよぼすビットはりつきの影響に関する実験”(田中, 1967)に記した 31.75 mm ビットによる実験結果を用いて説明を行なう。なおこの論文を以下前報と略記す。

1. 分岐点掘進率について

前報の第1, 3, 6図に示すようにビット荷重が小さく泥水循環の作用が十分であると考えられるところでは、掘進率とビット荷重の関係は直線で表わしうる。この直線を作作用線という(Bingham, 1964-65, 藤井, 1965)。この実験では作用線は次式で表わされる。

$$R_0 = mN(W - W_c)$$

R_0 = 泥水循環の作用が十分なときの掘進率

N = ビット回転数

W = ビット荷重

W_c = 交点荷重

泥水循環の値を一定に保ったままビット荷重を増加して行くと、掘進率は初めのうちは作用線に沿って増加して行すが、やがて作用線からはずれて横にそれてくる。同様にビット回転数を増加しても、掘進率はやがて作用線からはずれてくる。この掘進率が作用線からはずれてく

る原因は、ビットはりつきと掘屑の坑底残留できる。

泥水循環の作用が不十分になり、掘進率が作用線より分岐する点の掘進率を分岐点掘進率、またその点のビット荷重を分岐点荷重と新たに名づける。分岐点掘進率は前報第1図に見るように、流量が等しければ、ビット回転数には関係なく等しいと見なせる。前報第3, 6図に見るように、流量が少ないとさほど小さい掘進率、小さい分岐点荷重で作用線より分岐する。また分岐点荷重はビット回転数が多いほど小さい。

セメントモルタルと青石を 31.75 mm ビットで掘さくしたときの、分岐点掘進率と流量の関係は第1図に示す。流量 7 l/min 以下では、分岐点掘進率と流量の関係は、各供試体ごとの直線で表わされる。モルタルCでは 9.5 l/min の流量でも実験を行なったが、この点は直線よりはずれてきており、掘進率が大きくなると、掘屑の除去が困難になることを示している。31.75 mm ビットではノズル径の調節ができないので、泥水循環の作用の指標として流量を用いた。前報第8, 9図を見ると、泥水循環の作用の指標としては、流量より衝撃力または消費馬力を用いる方が妥当であることがわかる。

以上のことより、分岐点掘進率と泥水循環の間には、一定の関係があると考えられる。この両者の関係は、地質により変わると考えられる。現場の掘さく記録の解析より、分岐点掘進率と泥水循環の値との関係を数点グラフに取ることにより、泥水循環の値を変えたときの分岐点掘進率を推定しうると考えられる。

第1図 分岐点掘進率と流量の関係

第1表 供試体の性質

	直径 mm	圧縮試験			圧裂試験			$\frac{\sigma_c}{\sigma_t}$	ずり応力 τ , kg/cm ²	掘さく実験	
		縦横比	供試体数	平均値 σ_c , kg/cm ²	縦横比	供試体数	平均値 σ_t , kg/cm ²			m, mm/sec·kg	W_c , kg
モルタルA	29.4	2.1	5	500	0.58	1	40	11	90	6.58×10^{-5}	48
モルタルB	29.9	2.0	2	480	0.53	1	50	9	100	7.29×10^{-5}	40
モルタルC	30.0	2.0—2.1	3	420	0.53—0.59	7	40	10	80	9.38×10^{-5}	50
青石A	29.9	2.0	2	290	—	—	—	—	—	15.5×10^{-5}	24
青石B	30.0	1.9—2.0	12	270	0.3—0.53	7	40	7	70	12.9×10^{-5}	30
青石C	29.9	1.9—2.0	4	250	0.45—0.61	7	30	9	50	15.5×10^{-5}	24

註 むり応力は次式で計算した(小林, 1966)

$$\tau = \frac{\sigma_c \cdot \sigma_t}{2\sqrt{\sigma_t(\sigma_c - 3\sigma_t)}}$$

第1表に実験に使用したセメントモルタルと青石の強度, ならびに作用線の式の係数 m と交点荷重 W_c を記す。

2. 作用線より分岐後の掘進率

泥水循環の作用が不十分になると, 掘進率は作用線より分岐し横にそれてくる。このような状態における掘進率とビット荷重の関係を考察する。各ビット荷重に対する作用線の式で与えられる掘進率を R_0 , 掘進率の実験値を R とし, R/R_0 を相対掘進率と名づける。すなわち, 泥水循環の作用が不十分なときの掘進率と, 十分であるとみなしたときの掘進率との比である。ビット荷重が分岐点荷重より小さいときは相対掘進率は 1.0 であり, このときの掘進率は作用線の式で表わされる。ビット荷重 W と 交点荷重 W_c の差 ($W - W_c$) を, 分岐点荷重 W_b と 交点荷重 W_c の差 ($W_b - W_c$) で割ったものを, 相対荷重と名づける。分岐点荷重はビット回転数と泥水循環の強さにより変わる。($W_b - W_c$) の値はビット回転数に逆比例し, 泥水循環の強さに比例する。相対荷重は, ビット回転数と泥水循環との影響をその中に含んでいるといえる。ビット荷重が分岐点荷重に等しいとき, 相対荷重は 1.0 である。

$$\text{相対掘進率} = R/R_0$$

$$\text{相対荷重} = (W - W_c)/(W_b - W_c)$$

$$R_0 = \text{作用線で表わされる掘進率}$$

$$R = \text{掘進率}$$

$$W = \text{ビット荷重}$$

$$W_b = \text{分岐点荷重}$$

$$W_c = \text{交点荷重}$$

モルタルA (前報第 1, 3 図参照) および 青石B の掘進率とビット荷重の関係を, 相対掘進率と相対荷重を用いて整理したのが, 第2図と第3図である。これらの図より掘進率とビット荷重を用いると, ビット回転数や流量によりおのおの異なる曲線で表わされる関係が, 相対掘進率と相対荷重を用いると, 1本の曲線で表わしうることが分る。

31.75 mm ツーコーンビットで掘さく実験を行なったモルタルA, B, C および 青石A, B, C の相対掘進率と相対荷重の関係をまとめて示したのが第4図である。新ビットを用いたモルタルBとモルタルCの曲線は一致している。ビットが摩耗すると相対掘進率が大きくなる傾向を示している。モルタルA, 青石A および C の3本の曲線は互いに接近しており, 1本の曲線にまとめることも可能である。以上のことより, 相対掘進率と相対荷

第2図 モルタルAの相対掘進率と相対荷重の関係

第3図 青石Bの相対掘進率と相対荷重の関係

第4図 相対掘進率と相対荷重の関係

重の関係は、ビット摩耗が掘進率に影響するときはビット摩耗に関係するが、岩石の種類やビット回転数や泥水循環には関係なく定まると考えられる。

従来発表されている掘進率とビット荷重およびビット回転数との関係は、泥水循環の作用が十分なときしか適用できない。31.75 mm ビットの実験により、泥水循環の作用が不十分なところでのこれらの関係を、定量的に表わす方法が見出された。次の3つの関係式を用いれば、泥水循環の作用が十分なところから不十分なところまで、すべての範囲にわたって掘進率を計算することができる。

- 作用線の式
- 分岐点掘進率と泥水循環の関係式

c. 相対掘進率と相対荷重の関係式

aは泥水循環の作用が十分であるときの掘進率と、ビット荷重およびビット回転数との関係を表わす。bは泥水循環の作用が十分に行なわれる範囲、すなわち作用線の式が適用しうる範囲を表わす。cは泥水循環の作用が不十分なときの掘進率を表わす。この3式のうちaとbは地質により定まる係数を含んでおり、これらは地質ごとに掘さく資料の解析により求めると考えられる。cはビットの状態や型式により影響を受けるが、その他の条件には関係なく定まる一般的な関係であると考えられる。適当な掘さく資料の解析により、この関係を求めておけば、これは他の地域や地質にも適用しうると考えられる。

掘進率におよぼす泥水循環の影響を定量的に検討するに必要な諸値をそろえた資料は非常に少なく、わが国では皆無に近い。それで入手しうる最もよい現場資料である Thompson (1953) の資料を用いて、相対掘進率と相対荷重の関係を検討した。それを第5図に示す。多少点の散らばりはあるが、両者の関係はノズル径に関係なく、1本の曲線で表わすことができる。使用ビットは 9⁷/₈ in スリーコーンジェットビットである。第4図と第5図を比べると、相対荷重4で相対掘進率は8%ほど第5図の方が小さい。これはビット型式の差によると考えられる。

第5図の曲線は次式で表わされる。これを相対掘進率の式と名づける。

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{13}{\frac{W-W_c}{W_0-W_c} + 12} \right)^{3.85}$$

ここで求めた相対掘進率の式は、今後掘さく資料の集積により、多少の修正を受けることはありうると考えられるが、この式を用いて泥水循環の作用が不十分なときの、軟層用スリーコーンビットの掘進率を推定することができる。この相対掘進率の式と作用線の式を組み合わせると、作用線から分岐後に掘進率が最大になる条件が求まる。このときの掘進率は、一定の泥水循環の値で掘さくするとき達しうる最大の掘進率である。このときの条件は次により与えられる。

第5図 Thompson の資料より求めた
相対掘進率と相対荷重の関係

最大掘進率の条件

$$\text{相対荷重} \quad (W_m - W_c) / (W_b - W_c) = 4.2$$

$$\text{相対掘進率} \quad R_m / R_0 = 0.45$$

$$\text{最大掘進率} \quad R_m = 1.9 R_0$$

R_m = 作用線から分岐後の最大掘進率

R_0 = 分岐点掘進率

W_m = 最大掘進率に対するビット荷重

掘進率が最大になるのは相対荷重が4.2のときである。このときのビット荷重 W_m は、上式より分岐点荷重と交点荷重 W_c を用いて次のように表わせる。

$$W_m = 4.2(W_b - W_c) + W_c$$

ビット荷重を W_b より大きくして行くと W_m までは掘進率は増加し、 W_m で最大値に達する。 W_m 以上に増加すると、かえって掘進率は減少する。分岐点掘進率は、泥水循環の作用が十分な状態で達しうる最大の掘進率である。したがって泥水循環の作用が不十分になり、掘さく効率が低下してもよければ、泥水循環の作用が十分なときの掘進率の1.9倍まで、掘進率を増加することが可能である。分岐点掘進率と分岐点荷重は、いずれも泥水循環の作用の関数である。したがって、最大掘進率とそのときの荷重も泥水循環の作用の関数である。

3. ま と め

31.75 mm ツーコーンビットの掘さく実験結果より、泥水循環の作用が十分なところから不十分なところまで、すべての範囲にわたり、次の3つの式を用いて、掘進率を定量的に表わすことができることを明らかにした。

(1) 作用線の式。泥水循環の作用が十分なときは、掘進率はビット荷重とビット回転数に関係し、泥水循環

の値には無関係である。掘進率は次の作用線の式で与えられる。

$$R_0 = mN(W - W_c)$$

R_0 = 泥水循環の作用が十分なときの掘進率

N = ビット回転数

W = ビット荷重

W_c = 交点荷重

m = 係数

この式は Bingham(1964-65) が提案した式である。

(2) 分岐点掘進率の式。泥水循環の値を一定に保ったまま荷重を増加して行くと、初めのうちは掘進率は作用線に沿って増加するが、やがて作用線から分岐して横にそれてくる。この分岐点の掘進率を分岐点掘進率、ビット荷重を分岐点荷重と新たに名づける。分岐点掘進率はビット回転数には無関係であり、泥水循環の値のみに関係する。分岐点荷重はビット回転数と泥水循環の値とに関係する。この泥水循環の作用の指標としては、ビットノズルからの噴流の挙動の実験(田中, 1965 と 1966) および 95 mm ビットによる掘さく実験(田中, 1967)の結果より、衝撃力が妥当であると考えられる。分岐点掘進率の式は地質により異なると考えられ、個々の地質について実験または掘さく資料の解析により得られると考えられる。

(3) 相対掘進率の式。泥水循環の作用が不十分になると、掘進率は作用線より分岐してくる。作用線から分岐後の掘進率とビット荷重との関係は、新たに定義した相対掘進率と相対荷重を用いて、ビット回転数や泥水循環の値に関係なく表わすことができる。相対掘進率は、掘進率 R を同一のビット荷重とビット回転数を作用線の式に代入して得られる掘進率 R_0 で割った R/R_0 で表わされる。相対荷重は、ビット荷重 W と交点荷重 W_c の差 $(W - W_c)$ を、分岐点荷重 W_b と交点荷重 W_c の差 $(W_b - W_c)$ で割った $(W - W_c) / (W_b - W_c)$ で表わされる。相対掘進率と相対荷重の関係はビット型式や摩耗状態の影響を受けるが、その他のものには無関係と考えられる。Thompson(1953)の現場資料を解析して、軟層用スリーコーンビットに対する相対掘進率の式として次式を得た。

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{13}{\frac{W - W_c}{W_b - W_c} + 12} \right)^{3.85}$$

作用線から分岐後達しうる最大掘進率は、分岐点掘進率の1.9倍であり、そのときの相対荷重は4.2である。

ここで提案した方法のさく井現場への応用については、稿を新ためて報告したいと考えている。

参 考 文 献

- (1) Bingham M. G., 1964~65, A New Approach to Interpreting Rock Drillability : *O. G. J.*, Nov. 2, 1964—April 5, 1965.
- (2) Thompson G.D., 1953, A Practical Application of Fluid Hydraulics to Drilling in California : *A. P. I. Drill. and Prod. Prac.*, pp. 123~134.
- (3) 小林良二, 1966, 岩石のせん断強度について : 岩石強度試験に関するシンポジウムテキスト
- (4) 田中彰一, 1965, ビットノズルの噴流の挙動に関する研究 : 石技誌, 30巻, 2号, pp. 103~110.
- (5) 田中彰一, 1966, ロックビットの噴流の挙動に関する研究 : 石技誌, 31巻, 3号, pp. 87~95.
- (6) 田中彰一, 1967, 掘進率におよぼすビットはりつきの影響に関する実験 : 石技誌, 32巻, 1号, pp. 15~20.
- (7) 藤井清光, 1965, 最近の掘進率に関する研究 : 石技誌, 30巻, 7号, pp. 357~361.