ノンコアボーリングによる岩石強度の推定

三沢 清扶*・桜井 孝*
高橋 昭教**

Estimate of Rock Strength in Non-core Boring Operation

Seisuke MISAWA, Takashi SAKURAI and
Akinori TAKAHASHI

Abstract

Non-core boring with tri-corn bit has advantages in comparison with core-boring in boring operation and it becomes to be fairly certain to estimate the rock strength by measuring the cutting speed, thrust, torque and amount of revolution in non-core boring in situ.

It has been clear in laboratory test that there are three methods to estimate the compressive strength of rock by non-core boring.

- (1) To correlate it to the cutting speed and the multiplied product of the amount of revolution and thrust.
- (2) To correlate it to the boring power and the cutting speed.
- (3) To use the cutting coefficient α defined by pretest as

$$\alpha = \frac{\sigma_c \times R}{N \times W}$$

α ; coefficient of boring ability
 σ_c ; compressive strength (kg/cm²)
 R ; cutting speed (cm/min)
 N ; amount of revolution (r.p.m.)
 W ; thrust (kg)

In order to compare the results of laboratory test and the actual ones in field, both core boring and non-core boring were performed at the same point. The actual compressive strength was examined using the core-boring samples. Compressive strength of rock in non-core boring was also estimated by the three methods, and was compared to the former. Judging from the test results, it is clarified that the actual strengthes are similar to those estimated using the method (1) and (3), and in the case of the method (2) the estimated strengthes are commonly larger than the actual ones.

1. ま え が き

トンネルの掘削に先立ち、地質調査の一環としてコアボーリングを行ない、得られたコアの圧縮強度の値をトンネルの設計、または施工資料として利用している。このコアボーリングの代りに、コアボーリングより経済性、穿孔速度の面で有利なトリコンビットを使用したノンコアボーリングを行ない、コアボーリングと同程度の資料を得ようとする試験を行なっている。

室内試験の結果岩石の圧縮強度の推定が後にのべる3種の方法により可能であることがわかった。

これら3種の方法のうち、どの方法が実際の値と良く合致するか、計測および解析の難易、ならびに現場作業に当って室内試験で見逃した点はないかなどを確認する目的で、東北新幹線第2小金山トンネル建設予定地である東京起点 292 K 100 m の地点にコアボーリングを行ない、このコアボーリングと対比できるように、その山側 1 m の地点にトリコンビットを使用したノンコアボーリングを行なった。そして、コアボーリングの諸計測結果から得られたコアによる圧縮強度の値と、

* 鉄道技術研究所

** 国鉄 岐阜工事局

3 種の方法で求めた圧縮強度の推定値を比較することにより、ノンコアボーリングによる岩石強度推定法の実用性の可否を検討した。

2. 試験の概要

2.1 使用機器

測定に使用した機器名と型式は次のとおりである。

- 1) 試験機; 東邦式 DH-3 型 穿孔能力 20~300 m, スピンドル回転数 50, 100, 185, 350 rpm。最大推力 4000 Kg。ジーゼルエンジンで駆動。
- 2) ビット; コアボーリングではメタルクラウン (外径 65 mm。内径 51 mm。チップ数 5 個) を使用した。
ノンコアボーリングでは、軟弱から硬岩まで広範囲

写真-1 3M型ビット

にわたって適応性がある石油さく井機製作株式会社のビット径 76.2 mm (3 インチ) のトリコンビット 3M 型 (写真-1) を使用した。

- 3) 穿孔速度; 深度計 (検出器, 深度・速度記録増幅器); 北斗理研株式会社製・電圧発生型。
 - 4) 回転計; 坂田電機株式会社製・電圧発生型。
 - 5) 回転トルク変換器; 株式会社共和電業製・トルク変換器 TP-50 KMA 型 (max 50-kgm) と TP-100 KMA 型 (max 100 kg-m)。
 - 6) 圧力検知器; 株式会社共和電業製・PGM-100 KB 型 (max 100 kg/cm²)。
 - 7) 自記記録器; 株式会社渡辺測器製作所製・マルチコーダ MC 611-6H 型。
 - 8) 動的ひずみ測定器; 株式会社共和電業製・DPM-6E 型。
 - 9) 金網; スライム採取用 2 mm 目。
- なお、各機器の接続を 図-1 に示した。

2.2 測定項目

ボーリング時に測定および観察した項目はつぎのとおりである。

- 1) 穿孔速度。
- 2) 穿孔深さ。
- 3) 回転トルク。
- 4) 推力。
- 5) ロッド回転数。
- 6) スライム。

2.3 試験方法

穿孔に際しては、送水量と推力はデータの解析上一定としたほうが良いが、オペレーターが穿孔し易いようにコアボーリング、ノンコアボーリングどちらも推力

図-1 試験装置ブロック線図

のみ変化させてもよいことを認めた。ただし、ロッドの回転数は 90 rpm 一定として穿孔した。

孔内への送水は新鮮な水が十分に得られなかったのと、孔壁保護のために泥水を使用したので、排水をため池に導き循環水として使用した。また、循環水と同時に排出されるスライムを 2 mm 目の金網で受け 1 ストローク (50 cm) ごとにサンプルを採取するとともに、排水の色の変化についても観察した。

表-1 予備切削試験に用いた岩石の物性と切削係数

試験項目 岩 石 名	圧縮 強度 (kg/cm ²)	引張 強度 (kg/cm ²)	弾性波 速度 (g/cm ³)	単位体 積重量 (m/sec)	切削 係数
安 山 岩 (甲府)	2430	103	5620	2.73	0.024
頁 岩 (仙台)	1940	192	5670	2.72	0.027
花 崗 岩 (稲田)	1480	74.0	4380	2.61	0.028
凝 灰 岩 (白河)	440	38.9	3540	2.18	0.049
泥 岩 (有壁)	71	10.1	2590	1.82	0.037
砂質凝灰岩 (?)	250	—	3090	—	0.053
凝灰質流紋岩(姫路)	1320	81	4250	2.32	0.044
					平均 0.04

さらに、地山岩石の圧縮強度を推定するためのデータを得るために、表-1 に示すような圧縮強度がすでになわっている安山岩 (甲府産)、頁岩 (仙台産)、凝灰岩 (白河産)、泥岩 (有壁産)、砂質凝灰岩 (産地不明)、凝灰質流紋岩 (姫路産) など 7 種の岩に対してトリコンビットを用いて本試験と同じ条件で、事前に予備切削を行なっている¹⁾。

3. 地山岩石の圧縮強度推定法

圧縮強度の推定はつぎの 3 種の方法¹⁾ が考えられている。

- ① 穿孔速度と (推力) × (回転数) から求める方法。
- ② 掘削馬力と穿孔速度から求める方法。
- ③ 切削係数から求める方法。

まず、試験に先立ち予備切削試験から得たデータで図-2, 3 に示すグラフを作り、その図をもとにして図-4, 5 に示すような圧縮強度と (推力) × (回転数)、圧縮強度と掘削馬力との関係をグラフ化しておく。実際に穿孔したときに記録された穿孔速度、推力、回転トルクなどから掘削過程における各地層の圧縮強度を推定する方法が ① および ② である。

図-2 予備試験における推力と穿孔速度 (軟岩)

図-3 予備試験における推力と穿孔速度 (硬岩)

たとえば、ある地点の穿孔速度が 30 cm/min で、そのときの推力が 2.0 t であったとすれば (回転数: 90 rpm), 図-4 の中の点線で示すように推定圧縮強度 280 kg/cm² が得られる。また、ある地点の穿孔中の掘削馬力が 1.5 HP で、その時の穿孔速度が 5.0 cm/min とすれば、図-5 の中の点線で示すように 1360 kg/cm² の推定圧縮強度が得られる。

切削係数 α は、やはり予備切削試験から得られたデータを用い次式により計算した。

$$\alpha = \frac{\sigma_c \cdot R}{N \cdot W}$$

N ; ビット回転数 (rpm)

W ; 推力 (kg)

σ_c ; 試料岩石の圧縮強度 (kg/cm²)

R ; 穿孔速度 (cm/min)

その結果は表-1、図-6 に示すとおりで、これより切削係数の値は平均値の 0.04 と決定し、上式を逆算して圧縮強度を求める方法が ③ である。

なお、この推定法では $\alpha = 0.04$ として計算するので軟岩では実際の値より小さめに、硬岩では大きめに算出される。

4. 試験結果と考察

4.1 作業能率

当然のことではあるが、60 m たらずのボーリングにおいても正味作業時間当りの掘進能率は、コアボーリングの 1.95 m/h に対し、ノンコアボーリングでは 4.61 m/h と 2.36 倍の掘進能率を示し、ノンコアボーリングの作業性はすぐれている²⁾。

4.2 記録の説明

自記録させた穿孔記録紙の一部を図-7 に示した。この図の最上段の線はロッド回転数を表わす線で、90 rpm を示している。両ボーリングとも 90 rpm で穿孔したがトルクが増減しても駆動原動機のカバナーの作動で回転数が変化するような現象は認められなかった。

第2段目の線は回転トルクを示したものであり、穿孔速度の早い部分ではビット1回転当りの切込み深さが大きくなるので、ほぼ穿孔速度に比例して変動している。

第3段目は推力の線で、ほぼ一定の推力で穿孔していることがわかる。

第4段目の線は穿孔深さの推移を示すもので、1ストローク 50 cm の変化について記録している。この線の

図-4 (回転数) $\times$ (推力) 別の圧縮強度と穿孔速度

図-5 穿孔速度別の掘削馬力と圧縮強度

図-6 圧縮強度と切削係数の関係

図-7 穿孔深さ 34.9~35.4m 間の記録

傾斜は(穿孔深さ)/(穿孔時間)で平均穿孔速度になる。

第5段目に示した穿孔速度の変動線は瞬間穿孔速度を示し、速度基線(0点)からのふれ幅が速度の値である。この図では認められないが、この線のふれは地層中のクラックあるいは軟弱層の判別に利用できる。

最下段の線は穿孔時間を示すものである。

推力の記録の線で、穿孔深さ1ストロークのほぼ3/5のところで推力が一時低下しているが、これは使用した試錐機のビットに推力を与えるシリンダー部に欠陥があったためで、この現象はすべての記録に表われている。

図-8 三種の推定法による圧縮強度

この推力の下がった部分で回転トルクは減少し、穿孔の深さの線はほとんど水平に近くなり、ボーリングは前進していないことを示している。また、穿孔速度の線もゼロに近い値を示しており、回転トルク、穿孔深さ、穿孔速度の関係が良く対比されている。

なお、記録紙の紙送り速度は 30 cm/min である。

4.3 圧縮強度の推定

圧縮強度の推定は前にのべた推定法で推定し、その結果を図-8 に示した。また、同図にはコアボーリングで採取されたコアを用いて求めた圧縮強度を●印と×印で示した。●印は実際に圧縮試験機で荷重を加え強度を求めたもので、×印はショアカタサから求めた強度である。ショアカタサから強度を求めるのに使用したショアカタサと圧縮強度との関係³⁾を図-9 に示した。

コアボーリングで採取されたコアの圧縮強度をショアカタサから推定しなければならなかった理由は、コアが寸断されて採取されたために、実際に荷重をかけて行なう試験に用いる試験片の規格にコアを成形することができなかったためである。

図-8 をみると、穿孔速度と (推力)×(回転数) から求めたものと、切削係数から求めたものとは比較的良好に一致しており、掘削馬力と穿孔速度の関係から求めたものは前のふたつに比べ全般的に大きな値が得られている。

推定した圧縮強度と実際の圧縮試験から求めた強度

(ショアカタサから求めた強度も含む) に対する比を計算すると、穿孔速度と (推力)×(回転数) では比の平均が 1.10、切削係数では 1.00 でよく一致しているが、掘削馬力と穿孔速度から求めたものでは 3.10 と大きくになっている。これは、回転トルクの検出を地上部で検出したために穿孔中にロッドがたわんで孔壁と接触し、増大したトルクまで検出したため実際のトルクより大きく計測されたことに起因するのではないかと考えられる。

ただし、ノンコアボーリングを行なった地点で、コアボーリングと同一の深度に安山岩の礫が出るとは限らないので、安山岩の礫を除き角礫凝灰岩について計算している。

以上、ノンコアボーリング地点の平均圧縮強度を推定すると、10~38 m 間は 50 kg/cm² 程度で、ところどころに 200~800 kg/cm² 程度の転石があり、40~60 m 間は 100 kg/cm² 程度の圧縮強度を示す地層の中に 200~1000 kg/cm² 程度、まれには 2000 kg/cm² を越す礫を含んでいる地層と推定できる。

4.4 スライムによる岩種の判定

孔内から排出されたスライムを 2 mm 目の金網で受け採取したが、軟岩のためかスライム循環水に溶解してしまい、岩に含まれている硬質の部分だけが採取される結果となった。36 m までのスライムを観察すると浮石粒子が含まれていることから凝灰質の岩石ではないかと推定されるが、36 m よりさきのスライムはほとんど安山

図-9 圧縮強度とショアカタサの関係

岩の粒子で、スライムの観察だけでは岩種を判定することは困難であった。

また、排水の色は前にのべたように循環水としたために、ほとんど変化は認められなかった。

5. 今後の問題点

5.1 ビットの摩耗に対する補正

今回の試験地は軟岩であり、ビットの摩耗もあまりなかったため摩耗に対する検討は行なわなかったが、硬岩、中硬岩ではかなりの量の刃先の摩耗が考えられるので、ビットの摩耗による穿孔速度、あるいは回転トルクなどの計測値の補正法を確立しなければならない。

5.2 データ処理の迅速化

現象を記録紙上に波形として記録し、その波形を物指して読み取り、換算式に代入して計算する方法は最も原始的な方法であり、データの処理に多大の時間と労力を必要とし、ノンコアでボーリングのスピードアップをはかっても意味のないことになってしまうので、データ処理の迅速化を計る必要がある。この方法としては、たとえば現象をアナログ電圧として出力し、これを一定時間間隔ごとに A-D 変換器を用いて A-D 変換し、これを直接コンピュータで処理するオンライン方式、またはデータレコーダで記録、再生しコンピュータで処理するオフライン方式などが考えられ、現在では、適当な切削係数を記憶させ、直接圧縮強度が計算されプリントできる方式を採用している。

5.3 孔内の速度検層、電気検層など

ノンコアボーリングでの地質の確認は目によるものはスライムしかないもので、孔内の速度検層、電気検層、あるいは孔内テレビによる観察などを行ない地質情報をふやす必要がある。しかしながら、水平ボーリングでの検層は受振器、電極などの孔内への挿入は作業上いろいろ面倒なことが多いので研究する必要がある。

5.4 トルク変換器について

前述のように今回のトルク変換器の取付け位置では、穿孔深さが深くなると実際にビットにかかるトルクを検出しているのではなく、ロッドと孔壁との接触、あるいはねじれなどによって増大したトルクを検出していたと考えられるので、今後、計測事例をふやしトルクから求めた掘削馬力を利用して推定した圧縮強度の値が、常に大きな値を示すようであればトルクの測定は不要となろう。

5.5 試験機オペレーターへの事前教育

オペレーターには、穿孔前にこのボーリングの趣旨をよく説明し認識を強くしてもらう必要がある。特に、特

別なトラブルが発生しない限り穿孔前に指示した条件、たとえば、孔内への送水量は一定とする。ロッドの回転数は一定とする。推力を一定とする。などの条件は遵守してもらい、できるだけデータの変数を少なくする必要がある。

6. 結 論

今回は、最初の現場試験であり、早急な結論は出せないが一応つぎのようなことが結論としていえる。

- 1) 穿孔速度と (推力) × (回転数) から求めた推定圧縮強度の値と切削係数から求めた推定圧縮強度の値は比較的良好に一致した。
- 2) 推定圧縮強度と実際にボーリングコアを用いて求めた圧縮強度に対する比の平均が穿孔速度と (推力) × (回転数) から求めた推定値では 1.10、切削係数では 1.00 とよく合致しており、ノンコアボーリングでも岩石の圧縮強度の推定は可能である。
- 3) 回転トルクが大きく計測されたために、掘削馬力から求めた推定圧縮強度は大きめになったので、今後、計測事例を増やし、その結果によっては回転数、回転トルクの計測は不要となる可能性が高い。
- 4) 排出されるスライムの観察のみでは、岩種の判定は困難なことがあり、他のボーリング検層や判定法を併用する必要がある。
- 5) 今回は 3 種の推定法すべてについて推定値を算出したため、かなりの人工を必要とした。将来は計測事例をふやし、3 種の方法のうち最適な方法のみについて算出するとともに、小型コンピュータなどを利用してデータ処理の迅速化を計る必要がある。
- 6) ビット摩耗による補正は、どの推定法を利用するにしても最も問題となる事柄である。今回は軟岩のためと穿孔長が短かったので、ビットの摩耗は少なく補正法の検討までに至らなかったが、将来はこの方法を確立しなければならない。

7. あとがき

今回の試験では一応満足する答が得られたが、なにぶん軟岩であったので、硬岩ではどのような様相を示すかをみることはできなかった。しかしながら、この試験により大方の目途がついたので、今後、中硬岩および硬岩、さらには軟岩から硬岩の互層地帯で試験を行ない、ボーリングによる地質調査の高速化、省力化、合理化に役立てたいと考えている。また、先進水平ボーリングにも筆者らの考えが応用できるものと考えている。

最後に、この試験にご協力くださった国鉄仙台新幹線

工事局，白石工事区，大河原工事区，および東北ボーリング鑿泉株式会社の皆様に感謝の意を表する次第です。

引 用 文 献

- 1) 三沢清扶・高橋昭教：「ノンコアボーリングによる岩盤強度の推定法」鉄道技術研究所速報，No. 72-243. 昭和 47 年 11 月
- 2) 地質研究室「第二小金山トンネルの地質と掘削工法上の問題点」鉄道技術研究所速報，No. 74-16, 昭和 49 年 4 月
- 3) 三沢清扶・高橋昭教：「津軽海峡西口付近岩石の物理的性質」鉄道技術研究所速報，No. 62-277, 昭和 37 年 9 月

(昭和 53 年 9 月 4 日受理)