

(48) スロット削孔機とブレーカを用いた 硬岩トンネルの無発破掘削工法に関する研究

榊 奥 村 組 正会員	萩森健治
山口大学工学部 正会員	古川浩平
神戸市道路公社	横関義美
榊 奥 村 組	牧野卓三
山口大学工学部 正会員	中川浩二

A STUDY ON NON-BLASTING TUNNELLING METHOD BY SLOT DRILLING MACHINE AND HYDRAULIC IMPACT BREAKER

Kenji HAGIMORI,	OKUMURA CORPORATION
Kohei FURUKAWA,	Yamaguchi University
Yoshimi YOKOZEKI,	Kobe Municipal Highway Co.
Takumi MAKINO,	OKUMURA CORPORATION
Koji NAKAGAWA,	Yamaguchi University

Abstract

This paper describes newly developed non-blasting tunnelling method by slot drilling machine and hydraulic impact breaker, and presents the data obtained during actual tunnel excavation. Under the recent circumstance like tunnel excavation in urban area, the social needs of non-blasting excavation will increase considerably. Therefore, the main purpose of this study is to find how to excavate tunnel by non-blasting method more effectively. The conclusion of this study is that the cycle time of tunnelling and the reasonable length of slot can be calculated by the rock conditions like uniaxial compressive strength of rock and joints evaluated it's spacing. Once the cycle time of tunnelling can be determined as above mentioned, the most effective construction method, as to the arrangement of tunnelling equipment and the corresponded construction period, can be schemed.

1. まえがき

近年、都市域では硬岩掘削工事に種々の理由により発破が使用できない事例が増えている。その中で最近都市域において堅硬な花崗岩中を近年開発されたスロット削孔機とブレーカーを用いて完全に無発破でトンネル掘削が行われた。ここで用いられた無発破工法は全く新しい工法であるため、開発の過程において多くの試験や現場実験により工法の合理化が行われてきたが、現状ではまだまだ完成された工法とはいえない。

そこで本研究においてはこの工法により硬岩トンネルを実際に掘削したデータを解析することにより、本工事において行われてきた設計、施工の流れを解明するとともに本工法の合理性を示し、今後の同種施工への指針を得ようとするものである。

2. 実施工の概要

(1) スロット工法採用の経緯

本研究の対象とした第2新神戸トンネルは神戸市の市街地と北神地区を結ぶ新神戸トンネルの交通緩和のために計画されたもので現在の神戸トンネルの東側に並行して建設された延長約7.2kmの道路トンネルである。この第2新神戸トンネルの南坑口付近の山岳トンネル区間（2工区）の岩盤は硬質の花崗岩類であり、掘削は当初発破工法で計画されていた。しかしこの区間の一部ではルート上の約50m直上には民家があり、直下5.6mには北神急行電鉄のトンネルが交差し、さらに新幹線、水路トンネルが近在しているなど構造物が多数近接している。さらに新幹線新神戸駅北側斜面沿いの民家で発破の使用に対する同意が得られなかった。そ

これらのことから当区間においては民家や構造物に影響を与えることなく掘削する意図で、種々の無発破掘削工法が検討された。その結果スロット削孔機を用いる無発破掘削工法が最適であるとの結論に至り、この工法が採用された。

(2) 掘削方法

今回採用した掘削工法の概要は次のとおりである。

(イ) スロット削孔機によりトンネル外周部と中央部にスロットを削孔しこれを自由面とする。

(ロ) 1次破碎は行わず大型油圧ブレーカにより切羽面を直接打撃し2次破碎を行った後、ずり出しを行う。

自由面の作成には、スロット削孔機を用いた。このスロット削孔機のフィード長は2.2mであるので1掘進長を2.0mで計画した。施工では5台のスロット削孔機を3ブームおよび2ブームの油圧クローラジャンボに搭載して上半、下半にそれぞれ配置するのを原則とした。油圧ブレーカは重量3tおよび2tの大型のものを上半および下半に各1台配置した。掘削能率はブレーカ重量に大きく左右されることがこれまでのデータから知られており¹⁾、トンネル内で使用可能な最大級のブレーカを用いている。なおトンネル切羽の作業では横向きあるいは上向きの作業が多くなるため、これに適するようブームを改造した。

3. 収集したデータとその意義

本研究では実施工において採集されたデータを解析することにより、本工法の特性を明らかにし今後の施工に役立てることを試みている。採集したデータの概要は以下のとおりである。ここで①,③,④,⑤は掘削に際して採取したデータであり、②は掘削終了後データ解析の資料とするため採取したものである。

- ① 一軸圧縮強度 qu (kgf/cm²) : ロックシュミットハンマー計測値からの換算値である。切羽全体を6分割し、各分割区間について10回の計測を行い、各区間の測定値の内大きいものから2つ、小さいものから2つを除いた値の平均値から算出した。
- ② 節理評価 es : 掘削された岩盤の節理等の状況を経験技術者が3人それぞれ独立に5段階評価を行った平均値。なお、亀裂状況の判断は掘削後の該当する側壁の節理の発達状況から判断することを主とし、その5段階の評価を行う基準はBieniawskiの岩盤分類の節理間隔分類²⁾を参考に次のものを用いた。
 - 1) 吹付けが行われており、節理間隔は5cm以下 (評価点 1)
 - 2) 側壁のほぼ全面に節理が発達しており、その間隔は5~30cm (評価点 2)
 - 3) 2/3程度の側壁に節理が発達しており、その間隔は30cm~1m (評価点 3)
 - 4) 1/3程度の側壁に節理がみられ、間隔は1~3m (評価点 4)
 - 5) 節理間隔は3m以上でほとんど節理はみられない (評価点 5)
- ③ スロット長 sl (m) : 切羽に削孔されたスロットの長さ、すなわち切羽にマーキングしたスロット削孔線の延長
- ④ 換算削孔時間 dt (h) : m ブームのスロット削孔機を用いて削孔したとき、それぞれのブームの削孔時間を合計したもの、すなわち、1ブームのスロット削孔機で削孔したと仮定したときの削孔時間。
- ⑤ 仮想ハツリ時間 ht (h) : ブレーカによる破碎は3t級ブレーカによるものを主としているが時に2t級の応援も得ている。そこでこれまでの実績データから2t級ブレーカの能力を3t級のそれの1/3と考え、3t級の稼働時間 (L) と2t級の稼働時間 (M) の和を3t級のブレーカ稼働時間 (ht) に換算したもの。

本研究においては、上記のデータを基に地山の状況を表す要因と考えられる qu, es と掘削結果である $sl, dt, ht, dt+ht$ との関係を見出すのが主目的であると言える。

4. 実施工結果の検討および考察

最初に施工したランプ部では途中での機種の変更や掘削断面の変化など施工条件が一定ではなかったが、

ランプ部の貫通後に掘削を行った本坑ではこれらの条件がほぼ一定となった。そこで本坑上半部の約190m区間のうち一軸圧縮強度が1000kgf/cm²以上を示した区間の施工結果を本研究での検討の対象と考えた。

(1) 地山の状況とスロット周

長との関係…関数F1

図-1に本研究で地山の状況を表す因子と考えた節理評価(es)と一軸圧縮強度(qu)の相関を示す。esとquとはある程度の相関を示すもののその相関係数の値は小さく($\rho=0.357$)ほぼ節理と強度という岩盤の異なった性質を表しているものと考えることができる。

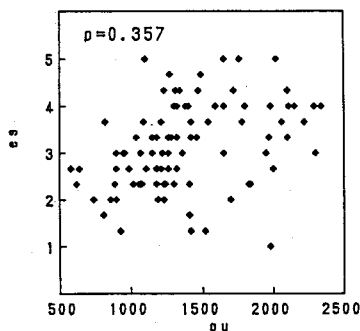


図-1 quとesの相関図

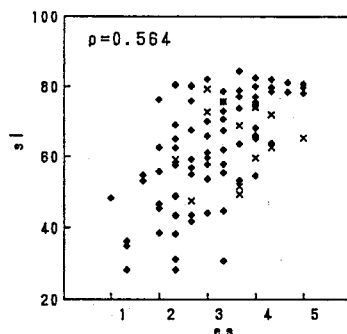


図-2 esとslの相関図

図-2に節理評価(es)とスロット周長(sl)との関係を示す。図から明らかなようにある程度の相関があるものと考えられる。また図中の×印はブレーカによる破碎困難が生じたため、追加スロットを行った合計のslに対応するものである。一軸圧縮強度(qu)とslとの関係は図には示していないが、相関係数 $\rho=0.492$ でこれもある程度の相関はあるものと考えられる。

qu, esを用いてslの重回帰分析を行った結果は次式で示される。この時の重相関係数 $\rho=0.697$ であった。

$$sl = F_1(qu, es) = 17.81 + 8.15es + 0.0139qu \quad (1)$$

スロット周長slの設計にあたっては最大の場合でも80m程度より特に大きくならない配置とすることを一つの基準としており、このことを考慮した上で当初設計のslはesとquを基にして決定されたと推定できる。

(2) 地山の状況、スロット周長と施工時間との関係…関数F2, F3

図-3, 4, 5に節理評価(es)、一軸圧縮強度(qu)およびスロット周長(sl)と削孔時間(dt)との相関を示す。いずれも相関係数 ρ が0.667, 0.699, 0.868と高く、相関があるものと認められる。これはes, quが高くなればslが増加し、またのみ下りが小さくなることからして納得のいくところである。

また, qu, esあるいはqu, es, slを用いてdtの重回帰分析を行った結果は次式で表される。

$$dt = F_2(qu, es) = -10.313 + 0.0323qu + 13.066es \quad (2)$$

$$dt = F'_2(qu, es, sl) = -34.15 + 0.0205qu + 6.342es + 1.016sl \quad (3)$$

ここに、重相関係数 ρ はそれぞれ0.830および0.940で、dtはqu, esあるいはqu, es, slで表されることが分かる。

図-6, 7にes, quとハツリ時間(ht)の相関を示す。es-HTは $\rho=0.608$, qu-HTは $\rho=0.497$ とes-HTの方が相関性は高い。また, qu, esを用いてhtの重回帰分析を行った結果は次式となり、 $\rho=0.678$ であった。

$$ht = F_3(qu, es) = -2.918 + 0.00375qu + 2.678es \quad (4)$$

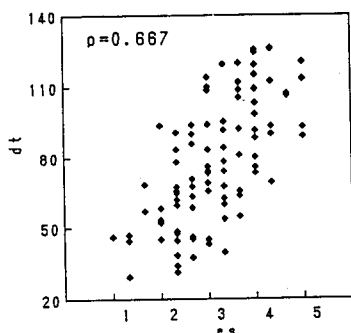


図-3 esとdtの相関図

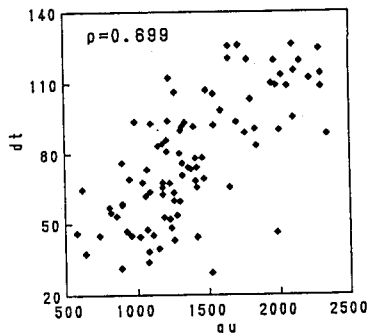


図-4 quとdtの相関図

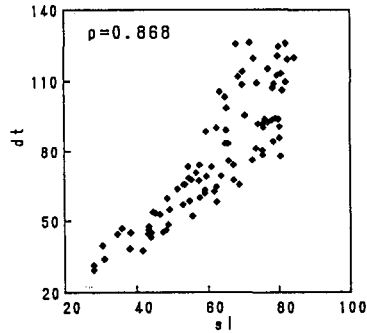


図-5 slとdtの相関図

(3) 仮想施工時間…関数F4

前節までの検討の結果, qu, esが与えられればslが決定され, さらにdt, htが推定されることが示された。しかし, 実施工がqu, es各々とsl, dt, htとの組合せで成り立っている以上, これらを組み合わせた変数で施工全体を見る必要がある。

地山状況としてesとquを用い, すでに式(1)で示した, quとesに

よるslの重回帰分析を行った結果の $F_1(qu, es)$ とdt, htとの相関を図-8, 9に示す。すでに示したesおよびquとdtとの関係(図-3, 4)とesおよびquとhtとの関係(図-6, 7)とを比べれば分かるように, dtとの相関の方がhtとの相関より大きく, この図-8, 9はその結果を反映している。

図-10は $F_1(qu, es)$ とdt+htの相関を示している。この ρ は0.839と非常に高く, 図-10からも線形関係にあることは明らかに認められる。すなわち, 地山の状況としてのes, quが分かれば1サイクルの仮想施工時間dt+htが推定できることを意味する。すなわち本工事においてslは $F_1(qu, es)$ を参考に決定されており, また仮想施工時間 dt+htも $F_1(qu, es)$ と良い相関を有していることが示された。このことは, 工期と経済性およびトンネルの断面形状などを考慮した上でスロット削孔機を何台投入し, かつブレイカーとしてどの程度の大きさのものを投入すれば良いかが決定できることを意味する。

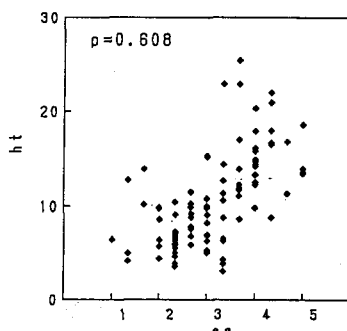


図-6 esとhtの相関図

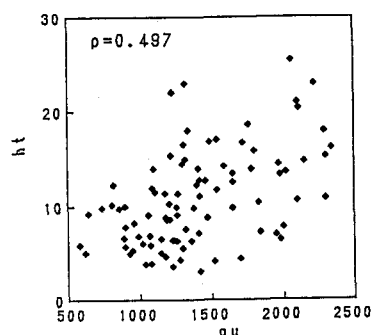


図-7 quとhtの相関図

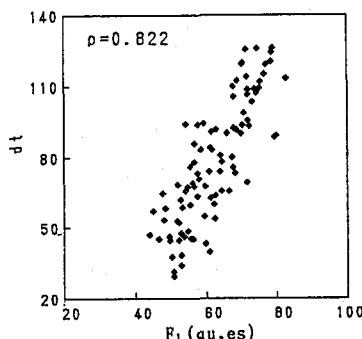


図-8 $F_1(qu, es)$ とdtの相関図

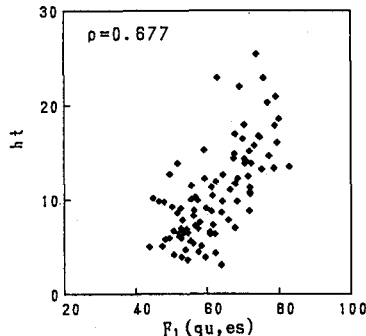


図-9 $F_1(qu, es)$ とhtの相関図

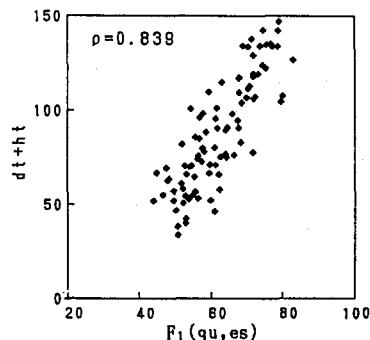


図-10 $F_1(qu, es)$ とdt+htの相関図

(4) サイクルタイム推定の方法

以上の検討結果により, 地山のqu, esとsl, dt, htとの関係が明らかになった。このことは, 地山の状況としてのqu, esがわかれば, 1サイクルの仮想施工時間dt+htが推定できることを意味する。しかし, 実際のサイクルタイムを求めるためには, これらの時間以外にずり出し, 吹付けコンクリート, ロックボルト, 測量, 休憩打合せ, 故障による休止等の時間をも見込む必要がある。これらの時間についての実測値を支保パターン別に平均した値を表-1に示す。

パターンA, B, Cは今回の施工区間で適用された支保パターンであり, パターンAの方が硬岩側である。またここでは本論文の主たる検討対象区間外であるパターンCの資料も参考とするため, これの含まれている本坑全区間のデータを示している。なお, スロット削孔には, 3~5台のスロットドリルを使用しており, ここに示すスロット削孔時間は, m台で削孔したときの時間として示す。

表より、サイクルタイムの合計時間(T)に対するスロット削孔時間(dt/m)とハツリ時間(ht)の合計の比率((dt/m+ht)/T)は、岩質が悪いほど小さくなる。図-11にスロット周長(sl)とこの比率(dt/m+ht)/Tの関係を示す。この図より分かるように、この比率はslに比例するかのようであり両者の関係は仮に次式で表すことが可能である。

$$\frac{(dt/m)+ht}{T} = 0.0115 \times sl \quad (5)$$

ここでsl,dt,htは式(1),(2),(4)でes,quの関数として与えられ、これを用いると式(5)は次のように書き換えられる。

$$T = \frac{(F_2(qu,es)/m) + F_3(qu,es)}{0.0115 F_1(qu,es)} \quad (6)$$

以上の結果、節理による岩盤評価(es)と一軸圧縮強度(qu)がわかれば、式(1),(2),(4)からsl,dt,htを推定でき、さらにm台1スロットドリルを用いた場合のサイクルタイム合計時間Tが推定できる。

工事施工前であれば、たとえばボーリングコアが得られれば、このコアからes,quを求めることにより、これらの時間を推定することが可能である。

5. あとがき

本研究はスロット削孔機とブレイカーを用いて、硬岩トンネルを無発破掘削する全く新しい工法について、実施工現場における実測データを基に論じたものである。近年の状況を見ると、硬岩トンネルを無発破で掘削する機会は大きく増加するものと考えられ、本研究の着目点もこのような施工をいかに合理的に行うかにある。

本研究で得られた結論は、地山の状況を一軸圧縮強度と節理の多少を基準に評価した節理評価とでもって規定すれば、スロット周長や1サイクルの施工時間が決定できることにある。この1サイクルの施工時間が決定できれば、設備配置や工期はそれに応じた最適な決定が可能である。

本研究を行うにあたり、各種の資料をこころよく提供して頂いた関係各位に感謝致します。また本論文をまとめるにあたり、山口大学工学部中尾絵理子教務員の助力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 本田裕夫・萩森健治・古川浩平・中川浩二：硬岩トンネルの無発破掘削に関する研究，土木学会論文集，第379号/VI-6，pp.55-64，1987年3月。
 - 2) Bieniawski, Z.T : Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling, Proc. 3rd Int., Long, Rock Mech., Vol.2, Part A, pp.27-32, 1974.
- あるいは 土木学会：トンネルにおける調査・計測の評価と利用，土木学会，pp.58-59，1987。

表-1 支保パターン別施工数量，時間

数 量	支保パターン	A	B	C
施工延長 (m)		32.8	177.7	63.7
進行長 (m)		2.0	2.0	1.5
スロット周長 sl (m)		68.0	60.0	29.0
スロット削孔時間 (dt/m)		39.1	22.1	4.9
ハツリ時間 (ht)		17.6	11.5	2.8
ずり出し		5.5	4.8	2.4
吹付けコンクリート		1.3	1.3	2.8
ワグセメント		0.0	0.0	2.0
測量		1.3	1.2	1.3
休憩・打合せ		7.2	5.8	3.0
故障による休止他		2.5	2.8	2.9
合 計 T		74.5	49.6	21.9
(dt/m+ht)/T		0.78	0.88	0.34

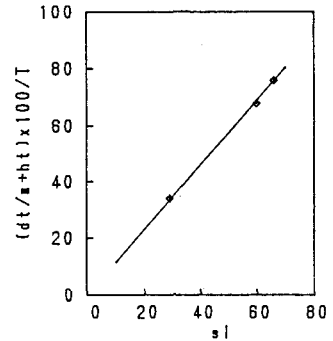


図-11 スロット削孔時間とハツリ時間の合計とスロット周長との関係