

油圧式削岩機のダンピング圧を利用した切羽前方探査法

Development of the fore survey system of tunnel face using damping pressure of Hydraulic drilling

山下雅之*・石山宏二*・稲葉 力*・早坂 茂**・塚田純一**

Masayuki Yamashita, Koji Ishiyama, Tsutomu Inaba, Shigeru Hayasaka and Junichi Tsukada

The fore survey system of tunnel face using hydraulic drilling was developed to estimate the geologic conditions ahead of the tunnel face. In this study, the data of drilling composed of damping, rotation and percussion pressures have been compared with Rock Mass Classification, and physical value (strength) of rock mass or specimens.

From this comparison it has been made clear that the data of damping pressure closely correlate with the properties of rock mass. As a result that the fore survey system on the basis of this relationship has been applied in tunnel, each location of the faults in thickness about 20 cm could be estimated.

keywords: fore survey of tunnel face, hydraulic drilling, damping pressure

1. まえがき

トンネル施工において切羽前方の地質状況を予め把握しておくことは、工程の見積もりや支保選定等の施工性および作業の安全性等を考慮する上で非常に重要である。掘削予定区間の地質状況を事前に把握する方法としては、地表踏査や鉛直ボーリング探査等の事前調査が挙げられるが、踏査精度やボーリング孔数の不足等の理由から掘削前に十分な地質情報が得られない場合が多い。このような事前調査の不備を補うために、トンネル坑内より切羽前方の地質を予測する探査(切羽前方探査)を掘削作業と平行して行う場合がある。この切羽前方探査法については、弾性波などの物理探査技術を生かして切羽前方の地質状況を間接的に予測する方法(間接的探査法)¹⁾や、水平ボーリング等を用いて切羽前方の地質状況を直接探査する方法(直接的探査法)等、これまでに数多くの探査法が開発されている。しかし、これら従来の探査法には、施工サイクルへの影響がなく、かつ、高い探査精度が得られるといったような利点を併せ持つものはなかった。

本研究では、上述の利点を併せ持つような探査法を開発を目的に、油圧式ジャンボの掘削作業時に削岩機が岩盤から受ける打撃反力を吸収する油圧(ダンピング圧)データに注目し、このダンピング圧データを用いて切羽前方の地質性状を予測する探査手法²⁾についての探査システムの構築、現場適用実験や供試体実験などの基礎的な検討を行った。

* 正会員 西松建設(株) 技術研究所

** ドリルマシン(株) 技術部

2. 探査法の概要

2.1 探査システム

探査システムは図-1に示すように、トンネル坑内において削岩機よりフィード圧、打撃圧、ダンピング圧や回転圧などの穿孔油圧データを収集・保存する計測システムおよび、現場事務所内において計測データを処理・解析する解析システムからなる。

(a) 計測システム

このシステムでは、トンネル坑内において削岩機のフィード圧、ダンピング圧、回転圧や打撃圧などの穿孔油圧データが油圧センサーを介して電圧信号に変換され、削岩機を搭載した重機(ジャンボ)に設置されたデータレコーダに取り込まれる。取り込まれたデータは、ジャンボのガイドシェルに設置された傾斜計からの電圧データとともにA/D変換されてフロッピーに保存される。また、探査は自動計測で行われるため、計測装置は通常作業への支障および装置の保護を考慮して図-2のようにジャンボ操作室の屋上に設置した。

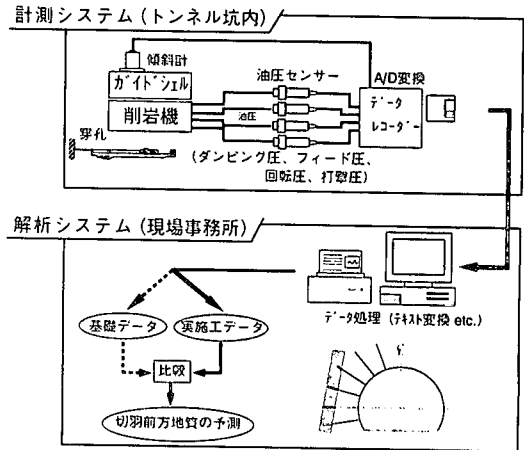


図-1 穿孔探査システム

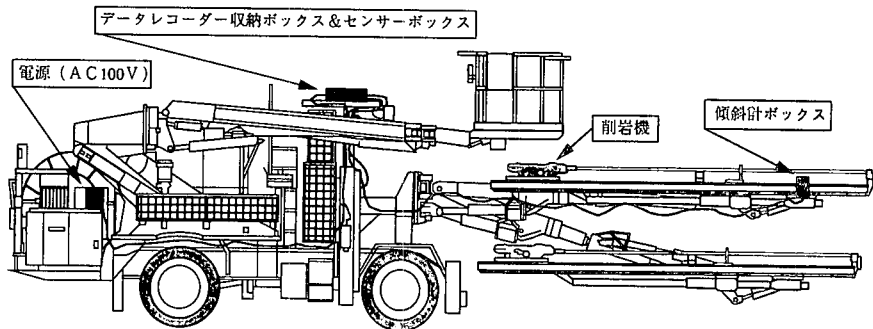


図-2 ホールジャンボおよび計測機器設置状況

(b) 解析システム

計測システムで得られた穿孔油圧データから、現場事務所のパソコン上で市販の表計算ソフトを用いてデータシートを作成する。そして、得られた穿孔データを予め計測されている各性状の岩盤の穿孔データ(基礎データ)と比較して穿孔区間の岩盤性状を予測する。この基礎データとは、切羽の岩盤調査により岩盤性状が正確に把握されている地点において探査に先立ち収集される穿孔データのことであり、この作業は掘削作業の休止時に切羽もしくは側壁において行われる。

2.2 削岩機の穿孔作動機構

探査に利用した削岩機の穿孔は、フィード、ダンピング、回転および打撃圧の4油圧系統が連動して作動することによって行われる。図-3に示すように穿孔作業は、フィードシリンダへの加圧(フィード圧)により削岩機およびロッド・ビットを岩盤に押しつけながらピストンに打撃圧を加え、ロッド・ビットに打撃エネルギーを伝達させて岩盤を破壊すると同時に、ビットの回転およびその先端から噴出される削孔水により破壊した岩片(くり粉)を排出させるといったサイクルを連続的に繰り返すことによって行われる。このとき、岩盤の破壊に要したエネルギーと打撃エネルギーの差分の余剰エネルギーが打撃反力として削岩機内のダンピングピストンに伝達された後、ダンパーの役割を持つ油圧(ダンピング圧)によって受け止められ、吸収される。

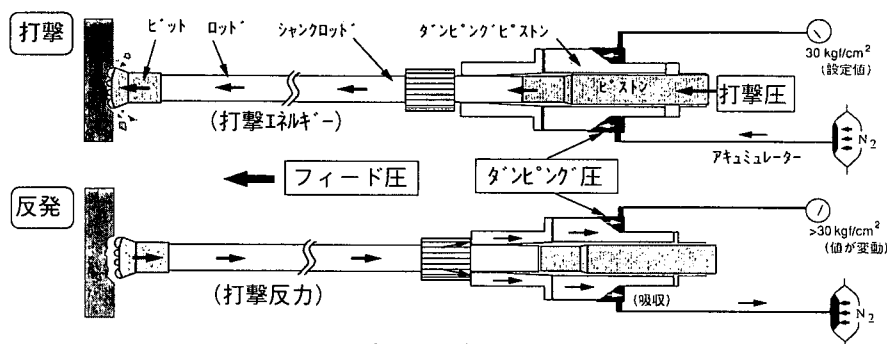


図-3 穿孔作動機構(模式図)

2.3 穿孔油圧からの地質評価

穿孔作業中に削岩機から岩盤に伝達される打撃エネルギーは一定であるので、岩盤からダンピングピストンに伝達される打撃反力の値は岩盤の性状によって変化する。すなわち、穿孔対象の岩盤が硬質である程1打撃当たりの岩盤の破壊に使用されるエネルギーが小さくなり、打撃エネルギーの余剰エネルギーである打撃反力は大きくなる。また、脆弱な岩盤はその逆に打撃反力は小さくなる。ダンピング圧はこの打撃反力を受け止める油圧であるので、ダンピング圧の値も打撃反力の値の挙動に同調して変化する。

今回、このようなダンピング圧の機能・性質に着目して、この油圧データを穿孔区間の岩盤の性状(地質状況)を把握するための指標として利用した。また、ダンピング圧の値は同一性状の岩盤であっても削岩機の押し付け圧であるフィード圧の値によって変化すると考えられたので、地質予測にはダンピング圧とフィード圧の穿孔データを予測パラメータとして用いた。

3. 実施工データを用いた探査実験

先に述べた予測パラメータを用いた探査法の適用性を確認するために、実際の施工データを用いた探査を試験的に行った。

3.1 探査トンネルの地質概要

探査を行ったトンネル施工区間の地質は、四万十帯に属する白亜紀～第三紀の泥岩優勢の砂岩・泥岩互層である。この岩盤の硬質部は、インタクト部の一軸圧縮強度が100MPaを越える。

3.2 基礎データの収集

切羽前方探査に先立ち、CH、CMおよびCL級岩盤についての基礎データを収集した。ここでCL級とした岩盤は弱破碎作用を受けた断層部を示し、CM-CL級とした岩盤は節理間隔が密(約2cm以下)でフィルム状の弱破碎部を挟むような岩盤を示す。また、CM級とした岩盤は弱破碎部を挟まないものの、節理間隔が比較密(約10cm以下)な岩盤を示し、CH級とした岩盤は節理間隔が約10cm以上の硬質岩盤を示す。

図-4は、基礎データの各岩級におけるフィード圧とダンピング圧の関係を表しており、このように両油圧の間には高い正の相関が認められる。

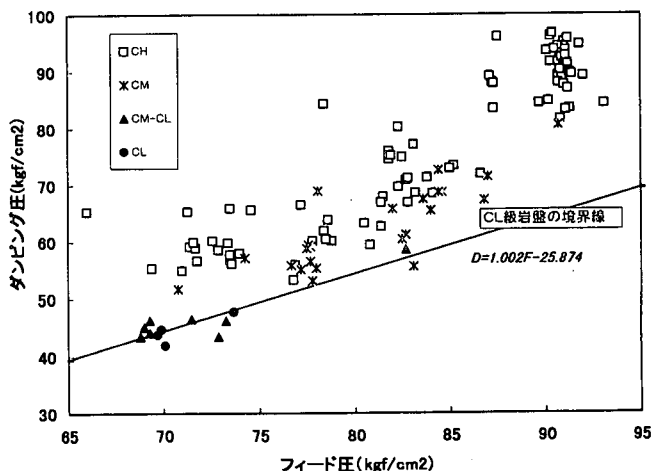


図-4 フィード圧/ダンピング圧関係図(基礎データ)

められる。また、同一のフィード圧条件下での各岩級データの分布域は、より硬質な岩盤程より高いダンピング圧領域に分布しており、フィード圧とダンピング圧の関係と岩盤性状との間においても相関関係が認められる。

3.3 地質予測方法

収集された各岩級の基礎データのうち、とくにCL級岩盤についてはその出現位置や規模が施工に大きく影響すると予想されたため、今回はこのCL級岩盤(弱破碎部)の出現状況の予測を探索目的とした。

予測作業の流れとしては、まず、図-4のような基礎データのフィード圧/ダンピング圧関係図において予測する岩級と他の岩級とを区分する境界線を設定する。そして、施工データの平均フィード圧をこの境界線の式に代入して得られたダンピング圧の値を予測対象の岩級が示す境界値として算出し、境界値を施工データのダンピング圧データと重ね合わせて穿孔区間の地質予測を行う。

今回の実験で収集した基礎データでは、図-4に示すようにCL級岩盤データがCL級およびCM-CL級岩盤データの回帰直線上もしくはそれ以下の領域に分布していることから、この回帰直線をCL級岩盤が示す境界線($D=1.002F-25.87$)として設定し、この境界線以下の領域をCL級岩盤領域とした。そして、図-5に示すように施工によって得られたダンピング圧データが算出された境界値以下になる区間をCL級岩盤(弱破碎部)として予測した。

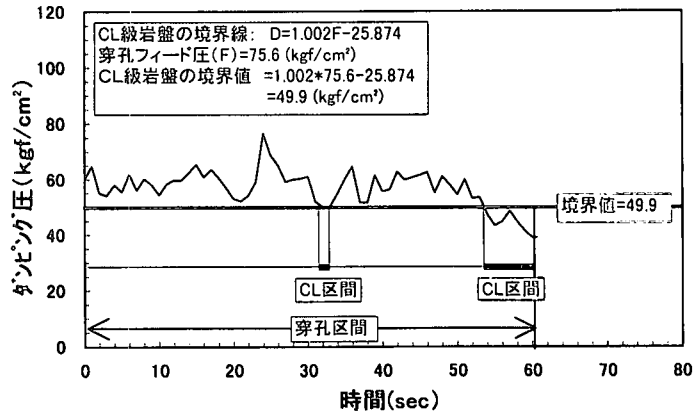


図-5 CL級岩盤(弱破碎部)区間の識別

3.4 探索結果

以上のような地質予測方法を用いて、施工データを利用した切羽前方探索を約 50m 区間において連続的に行った。今回対象としたトンネルでは、出現する破碎帯がトンネル軸と低角に斜交する方向性を持ち、さらに左側壁より出現すると予想されたので、探索はとくに左側壁のロックボルト打設時の穿孔データを利用して行った。さらに、この作業を掘削に伴うロックボルト打設用穿孔時に毎回行い、弱破碎帯の3次元的な連続分布を予測した。図-6は探索によって予測された弱破碎帯をSL断面図上にプロットし、実際に出現した地質と比較した図である。探索区間において幅約 20cm 程度の連続性の乏しい弱破碎帯が3層出現したが、探索によっていずれの破碎帯についてもその出現位置を比較的精度よく予測することができた。

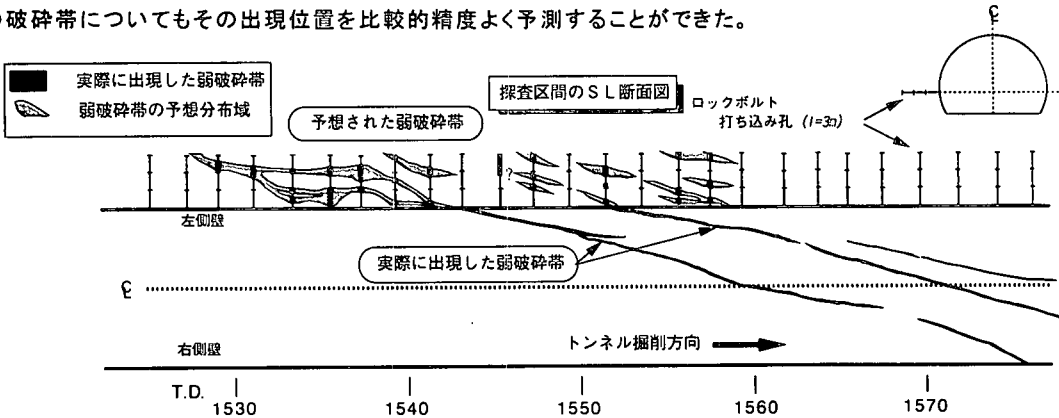


図-6 探索結果と実際の地質との対比

4. 供試体を用いた穿孔実験

探査実験において収集された岩盤の基礎データにより、ダンピング圧が相対的な岩盤性状(岩級区分)と高い相関を示すことがわかった。そこで、次にダンピング圧と岩盤強度等の岩盤物性との関係を確認する事を目的に岩石供試体を用いた穿孔実験を行った。

4.1 実験概要

実験に使用した岩石供試体は、約 1.5m^3 の試料3体である。それぞれの供試体の岩種・物性についての一覧を表-1に示す。

実験は図-7の配置図に示すように、各供試体の $1\text{m} \times 1\text{m}$ の垂直面上において約 40ヶ所の水平穿孔を 14～20cm 間隔で行い、フィード圧の各設定条件下(約 $40 \sim 110\text{kgf/cm}^2$)における穿孔時のダンピング圧、回転圧および打撃圧を計測した。このとき、供試体の自由面がダンピング圧データへ及ぼす影響を考慮して奥行き 1.5m の供試体に対して穿孔長を 1m に設定し、また、穿孔時の供試体の移動を防ぐために穿孔面の反対側をバックホウのバケットで押さえて十分な反力をとった。

表-1 供試体の物性値

岩 種	一軸圧縮強度 σ_c (MPa)	弾性係数 E_{50} (GPa)	ポアソン比 (ν)	弾性波速度 V_p (m/s)	弾性波速度 V_s (m/s)
稲田花崗岩	181	51.6	0.19	4012	2405
三城目安山岩	84	15.2	0.16	3744	2101
芦野安山岩	33	7.8	0.19	2929	1838

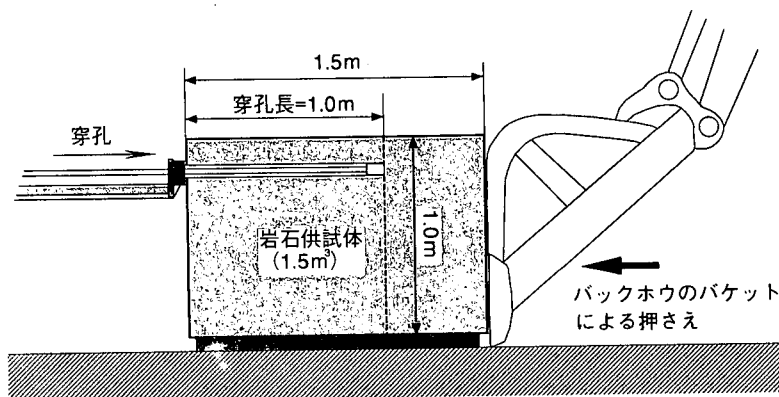


図-7 実験配置図

4.2 実験結果

各供試体穿孔データのフィード圧とダンピング圧の関係を図-8に示す。また、探査実験において収集された基礎データの弱破碎帯データ(CL、CM—CL級岩盤データ)も比較のためにこの関係図に加えた。また、この実験では岩盤の不均一性(例えば節理などの割れ目の存在・方向など)がダンピング圧データに与える影響を極力抑えるため、比較的均質な供試体を使用した。その結果、いずれの供試体においても非常にばらつきの小さいデータ($0.995 \geq \text{相関係数}(R) \geq 0.983$ 、 $1.589 \leq \text{標準偏差}(s.d.) \leq 2.747$)を得ることができた。各供試体データの分布域を見てみると、同一フィード圧において強度が大きい供試体ほどより高いダンピング圧領域に分布しており、岩盤強度とダンピング圧の関係が図-4に示した岩級とダンピング圧との関係と同様の傾向を示すことが確認できた。また、各供試体の回帰直線の傾きは非常に近い値(約 1.4)を示し、フィード圧に対するダンピング圧の増加の割合はほぼ等しい。

比較のために図-8に加えた弱破碎帯データの分布が集中しているフィード圧(70 kgf/cm^2)付近における供試体の一軸圧縮強度(σ_c)とダンピング圧の関係は、強度が約 180MPa の稲田花崗岩と約 80MPa の三城目

安山岩、約 30MPa の芦野安山岩のダンピング圧の差はそれぞれ約 5 kgf/cm²、約 8 kgf/cm² であり、同じく稲田花崗岩と弱破碎部のダンピング圧の差は約 14 kgf/cm² である。ここで、各供試体の回帰直線の傾きはほぼ同じ値を示すため、それぞれのダンピング圧の差は他のフィード圧領域においてもほぼ同様の関係が得られる。一方、弱破碎帯の回帰直線の傾きは供試体のそれに比べて小さい値(約 1.0)を示すため、設定フィード圧が高くなる程弱破碎帯と各供試体のダンピング圧の差は大きくなる傾向が認められる。

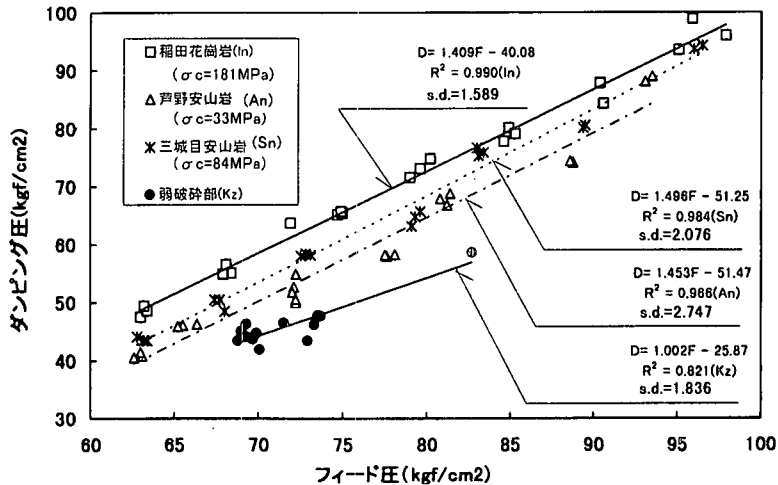


図-8 供試体強度 (σ_c) とダンピング圧/フィード圧との関係

5. まとめと今後の課題

施工サイクルへの影響を与えずに切羽前方の地質性状をより精度よく把握することを目的に、施工重機であるドリルジャンボの穿孔圧(ダンピング圧)を利用した切羽前方探査法を開発し、その適用性について検討した。そして、以下のような結果が得られた。

- ① ジャンボに搭載された削岩機の穿孔油圧のうち、フィード圧とダンピング圧の関係は岩盤の性状(岩級区分)と高い相関を示す。
- ② 地質予測方法としては、基礎データおよび施工時のフィード圧データより求められた境界値と施工時のダンピング圧データとを比較する方法を用いた。そしてこの方法を用いて実際に探査を行った結果、幅 20cm 程度の弱破碎帯においてもその出現位置を精度よく予測することができた。
- ③ 岩石供試体に対して行った穿孔実験の結果、フィード圧とダンピング圧の関係が①の岩級区分の場合と同様に岩石(岩盤)強度についても高い相関を示すことを確認することができた。

今後の課題としては、③で述べた岩石強度と穿孔油圧(フィード圧、ダンピング圧)の関係について、さまざまな強度の供試体データをさらに収集して識別可能な岩石強度区分について検討し、穿孔データから直接岩盤強度を推定できるような探査・解析方法を確立することが挙げられる。そうすることにより、施工現場の多様な要求に応じて探査対象を岩級区分や岩盤強度から選択し、幅広い対応を迅速に行うことが可能となる。

6. 参考文献

- 1) 稲葉, 石山, 明石, 平野 : 切羽前方予知システム, 建設機械, vol. 32, No.4, pp. 40-45, 1996.
- 2) 山下, 石山, 稲葉, 早坂, 塚田 : 油圧式ホイールジャンボの穿孔圧を利用した切羽前方探査法の開発, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 3 部(A), pp820-821, 1996.