

油圧式削岩機の穿孔圧を利用した切羽前方探査法の現場適用実験

Application of Geological Survey System using Hydraulic Drilling to Tunnel Face

山下 雅之*	石山 宏二**
Masayuki Yamashita	Koji Ishiyama
稲葉 力**	岡本 修***
Tsutomu Inaba	Osamu Okamoto
小野 利昭****	安部 俊夫****
Toshiaki Ono	Toshio Abe

要 約

トンネル切羽前方の地質性状を正確かつ迅速に把握することを目的に、油圧式削岩機の穿孔時に得られる油圧情報を利用した探査法（穿孔探査法）の開発を進めている。今回、切羽前方の性状を把握する簡易探査法として、施工時によく行われている“探り削孔”に対する本探査法の適用性について検討し、その汎用性の拡大を試みた。その結果、探り削孔で地質予測に使用されていた、くり粉の性状や湧水状況等の目視情報に加え、穿孔油圧データや穿孔速度を数値データとして収集することにより、より客観的な地質予測を、施工サイクルに影響を及ぼすことなく行うことができた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 探査法の概要
- § 3. 長区間探査の適用実験
- § 4. 考 察
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

山岳トンネルの施工において、簡易かつ精度の高い切羽前方地質の予測を行うことを目的に、ドリルジャン

ボに搭載されている油圧式削岩機の穿孔油圧を利用した、切羽前方探査法（穿孔探査法、以下本探査法と略す）の開発を進めている。

これまでの研究では、主に施工時の穿孔データを用いて数m程度前方の地質予測を繰り返し行い、常に次切羽の地質性状を把握する比較的短区間の地質探査への適用方法について検討してきた¹⁾。本研究では、本探査法の適用範囲を検討するため、切羽前方約30mという比較的長区間において行われる“探り削孔”時に本探査法も併用させ、その適用性についての基礎的な検討を行った。

§ 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

* 技術研究所地質研究課

** 技術研究所土木技術課

*** 技術研究所機電課

**** 関東(支)奥多摩(出)

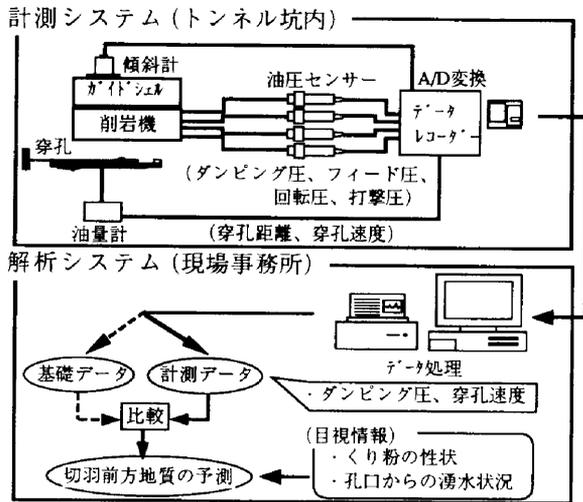


図-1 探査システム

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や穿孔速度データを収集・保存する<計測システム>、および現場事務所において計測システムで収集された計測データを処理・解析する<解析システム>からなる。

(1) 計測システム

ここでは、穿孔時の各種油圧データ、ガイドシールドの角度データおよび穿孔深度データがトンネル坑内において収集・記録される。穿孔油圧データおよび角度データは、それぞれ油圧センサー、傾斜計を介してデータレコーダに記録される。穿孔深度データは、まず油量計を用いてフィードシリンダへの流入油量を計測し、それを積算計で深度データに変換してからデータレコーダに記録される。また、これらの計測機器類は施工データの自動計測にも対応させるため、図-2に示すようにジャンボ本体の安全かつ通常作業の妨げにならない箇所に常設されている。

(2) 解析システム

ここでは、計測システムで得られたデータを現場事務所のパソコン上で処理し、図-3のような各油圧および穿孔速度の深度分布図として示されたデータシートが作成される。そして、得られた穿孔データと予め収集された基礎データとを比較して穿孔区間の地質性状を予測する。ここで、基礎データとは、探査に先立ち、各現場毎に代表的な地山性状の岩盤を複数穿孔し、穿孔地点の地質性状を詳細に調査した後、穿孔データとの関係性を評価したものを示す。

2-2 地質評価方法

探査に使用した削岩機の模式断面図を図-4に示す。

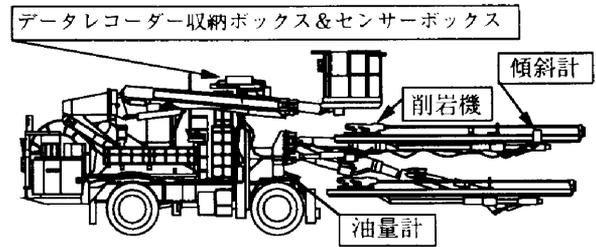


図-2 計測装置設置状況

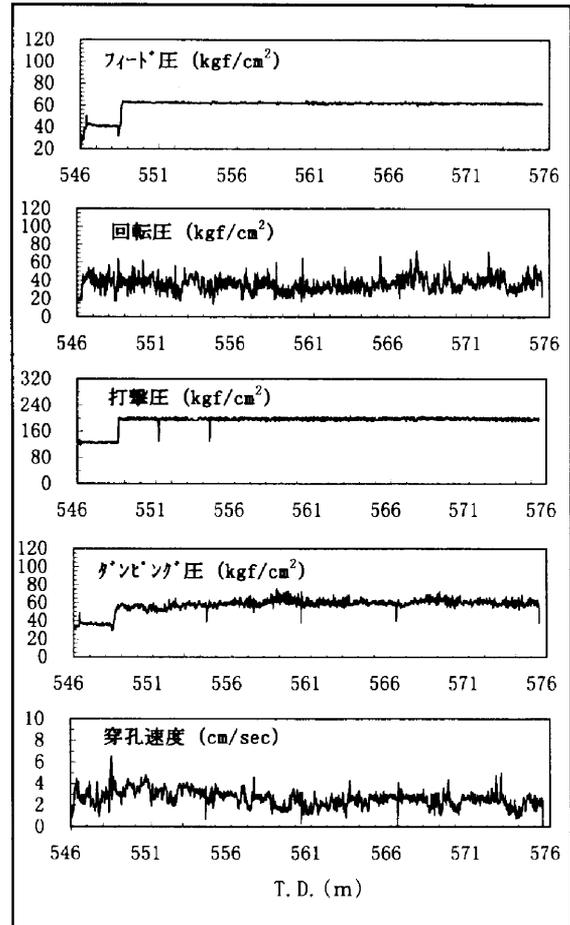


図-3 穿孔データ出力例

図に示した各穿孔油圧の中で、地質評価のパラメータとしてとくに岩盤からの反力を受け止める油圧であるダンピング圧に注目した。

穿孔時において、削岩機の打撃エネルギーは一定であり、同一のフィード圧条件下で穿孔した場合の打撃・給進反力は岩盤性状によって変化する。すなわち、打撃反力については、穿孔する岩盤が脆弱である程、1打撃あたりの岩盤の変形・破壊に使用されるエネルギー量が大きくなり、その余剰エネルギーである打撃反力は小さくなると予想される。給進反力についても、岩盤が脆弱である程、1打撃あたりの岩盤破壊量（掘進長）が大きくなり、設定

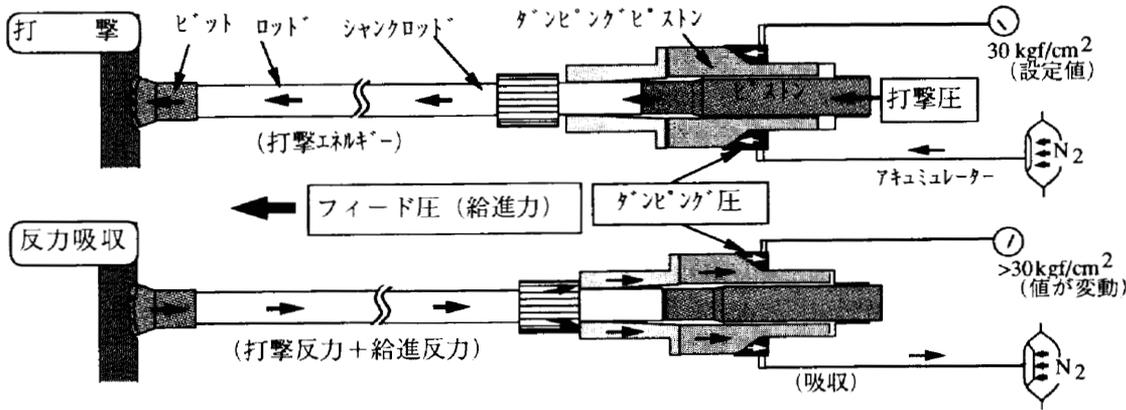


図-4 掘岩機の模式断面図

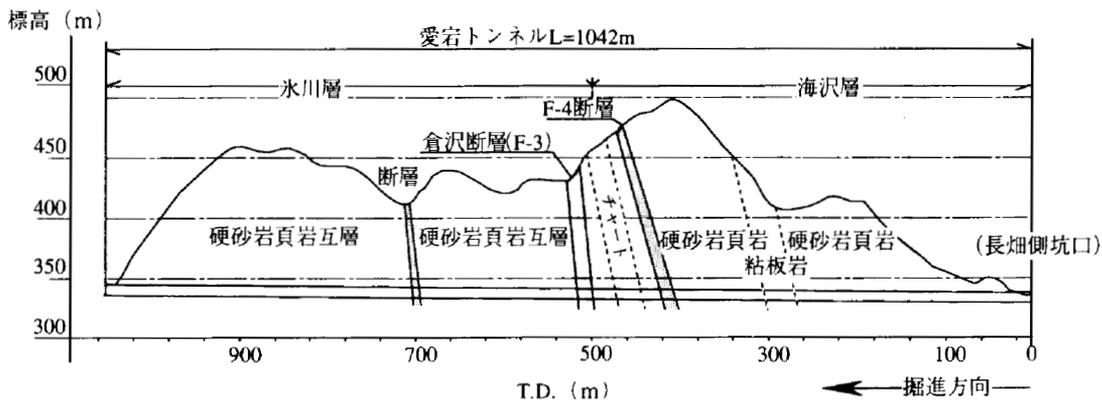


図-5 事前地質調査による愛宕トンネルの地質状況

フィード圧が新たに形成された穿孔面に十分に働かないうちに次打撃が加えられるため、その反力も小さくなる。また、穿孔時のこれら反力の挙動はすべてダンピングピストンに伝達され、それに同調しているダンピング圧も同様の挙動を示す。

地質予測は、上述のような特性を持つ穿孔油圧（ダンピング圧）の挙動に加え、同時に得られる穿孔速度やくり粉の性状、孔口からの湧水量等も参考にして総合的に行われる。

§ 3. 長区間探査の適用実験

3-1 適用トンネルの概要

(1) 工事概要

愛宕トンネルは、主要地方道奥多摩・青梅線（吉野街道）の丹三郎地区から小留浦地区までの区間を、国道411号（青梅街道）のバイパスとして計画されている多摩川南岸道路の西端に位置する。トンネル延長は1,043mで、掘削断面は標準部で約72.5m²である。掘削はNATMにより行われる。

(2) 地質概要

トンネル周辺には、中生代ジュラ紀の秩父中・古生層と呼ばれる堆積岩層が広く分布している。事前地質調査によるトンネル施工区間の地質状況は、図-5に示すようにトンネル東側坑口（長畑側）より前半区間は砂岩、粘板岩およびチャートからなる海沢層が分布し、後半区間には砂岩、粘板岩からなる氷川層の分布が予想されている。また、海沢・氷川層の境界部付近には両層を境する倉沢断層（F-3）およびその派生断層（F-4）の出現が想定されている。これらの断層の幅は10～20mと比較的規模が大きく、湧水を伴う可能性が指摘されていた。

3-2 適用方法

(1) 適用範囲

表-1に示すように、T.D.358.2～575.5m区間において約30m区間の探査を合計6回行った。とくに第2～4回探査は、事前調査で推定された断層（F-3,F-4）の有無またはそのより正確な出現位置の把握を目的に行った。

(2) 計測概要

先端に50φのビットを装着したロッド（L=305cm、32φ）で初期穿孔し、そのロッドと削岩機との間に順次同

様の中間ロッドをスリーブ (43φ) にて継ぎ足しながら合計約30mの探り削孔が行われ、それと同時に図-1のシステムにて記録し、後にデータシートの作成を行った。

穿孔時の削岩機の設定油圧は表-2に示す通りである。ただし、初期穿孔区間に関しては孔曲がりやを極力抑えるために設定油圧より低い値 (フィード圧: 3.9MPa (約40kgf/cm²)), 打撃圧: 15.7MPa (約160kgf/cm²)) で穿孔したため、地質予測区間からは除いた。探り削孔および計測には約2時間程度を要し、昼勤と夜勤の交代時の施工休止時間を利用して行われた。

図-6には、今回の適用トンネルにおいて探査に先立ち収集した基礎データを示す。図から明らかなように、同様な性状を示す地山を穿孔した場合、フィード圧とダンピング圧は線形の関係が認められる。

3-3 探査結果

計測結果のうち、地質予測に用いたダンピング圧の挙動を図-7に、穿孔速度の挙動を図-8に示す。この節では、まず計測結果からの地質予測 (脆弱部の識別) 方法について述べ、次に各探査における地質予測結果について詳述する。

(1) 計測結果からの地質予測方法

図-7のダンピング圧の挙動からの地質予測は、図中に示した弱破碎部予想値を目安にして行った。この予想値とは、図-6に示した基礎データ中の弱破碎部データから得られた回帰式に設定フィード圧を与えることにより求められた値であり、弱破碎部を掘削した場合のダンピング圧予想値を示す。したがって、穿孔時のダンピング圧の値がこの値以下もしくはそれに近づく程、地質が脆弱であると予測することができる。

図-8の穿孔速度データに関しては、過去に行った供試体を用いた穿孔実験より、脆弱層と判断する境界値を6~8cm/s以上とした。ただし、このデータは約1mの穿孔データであり、長区間穿孔の場合にはロッドの曲がりや継手と孔壁との摩擦等が穿孔速度に影響を与える可能性が考えられる。そこで、穿孔深度10mまでの比較的穿孔深度が浅い区間については脆弱部を識別する目安として上述の境界値を利用し、それ以深については相対的な速度上昇を目安とした。

(2) 地質予測結果

前項で述べた予測方法を用いて行った各探査の地質予測結果を以下に述べる (以下、ダンピング圧に関する記述については図-7を、穿孔速度に関しては図-8を参照のこと)。

①第1回探査

この区間のダンピング圧は、全体的に弱破碎部の予想

表-1 探査範囲と対象地質

探査番号	探査範囲 T. D. (m)	探査対象地質
1	358.2-387.0	チャート層の脆弱部
2	377.4-406.2	F-4断層
3	402.0-430.7	F-4断層
4	484.2-514.1	F-3断層
5	511.0-540.3	砂岩・頁岩混在層の脆弱部
6	546.0-575.5	脆弱な頁岩優勢層

表-2 設定油圧

探査番号	1	2	3	4	5	6
フィード圧 (kgf/cm ²)	65	66	64	63	64	62

*設定フィード圧が58kgf/cm²以上のときの打撃圧は200kgf/cm²に自動設定される。

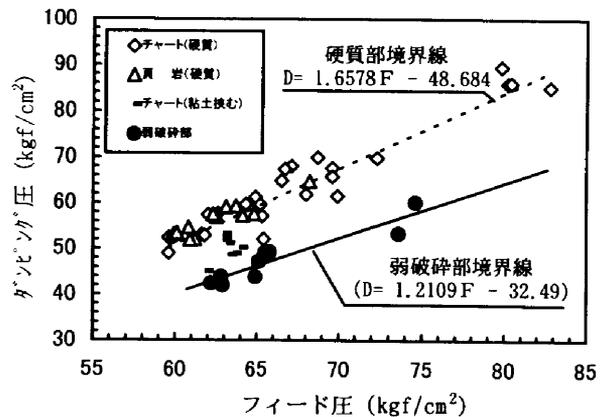


図-6 愛宕トンネルの基礎データ

値よりも2.0MPa (約20kgf/cm²) 程度高い値で安定しているが、部分的に若干値が低下している区間が認められた。これらの低下区間はロッドの継ぎ足し部に相当するため、その影響が考えられた。一方、穿孔速度の挙動を見てみると、T.D.363.5~364.5m付近およびT.D.369~371m付近に顕著な速度上昇が認められた。これらの上昇区間は1mにもおよぶため、ロッド継ぎ足し時の影響だけではなく地質性状も反映していると予想した。

ただし、これらの区間では、それほど顕著なダンピング圧の低下も認められず、また、予想区間も短いことから、施工にはそれほど影響は与えない程度の弱層と予測した。また、全区間においてチャート片のくり粉が認められたため、岩種はチャート層であると予測した。

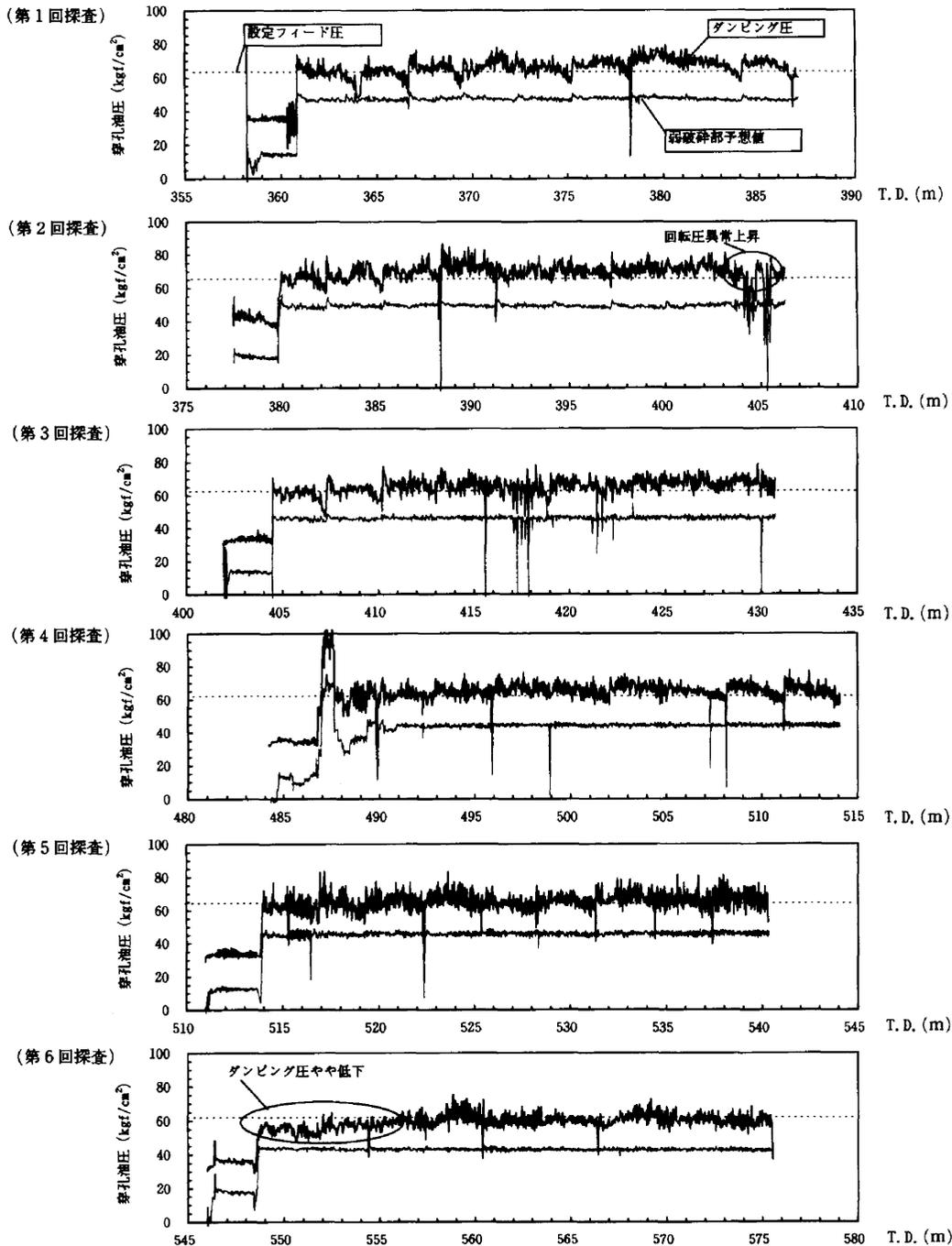


図-7 探査結果 (ダンピング圧)

②第2回探査

この区間の探査では、事前調査で出現が推定されたF-4断層 (T.D.405~415m) の有無もしくはその出現位置を把握することを目的に行った。

この区間においてもダンピング圧は、第1回探査と同様に比較的高い値で安定している。ただし、T.D.404.0~405.2m区間において回転圧が異常に上昇し、削岩機のアンチジャミング装置が働いてフィード圧が低下する現象

が認められた。このような回転圧の上昇は、地質脆弱部などの地山性状の影響もしくは長孔穿孔による孔曲がりによって生じるロッド・継ぎ手と孔壁との摩擦等による機械的な影響が考えられる。

今回の場合、この区間において削孔水が乳白色から赤褐色への変化が認められ、また、穿孔速度の上昇も認められたため、この区間をF-4の可能性のある地質脆弱部として予測した。岩種については、くり粉の性状よりチャ

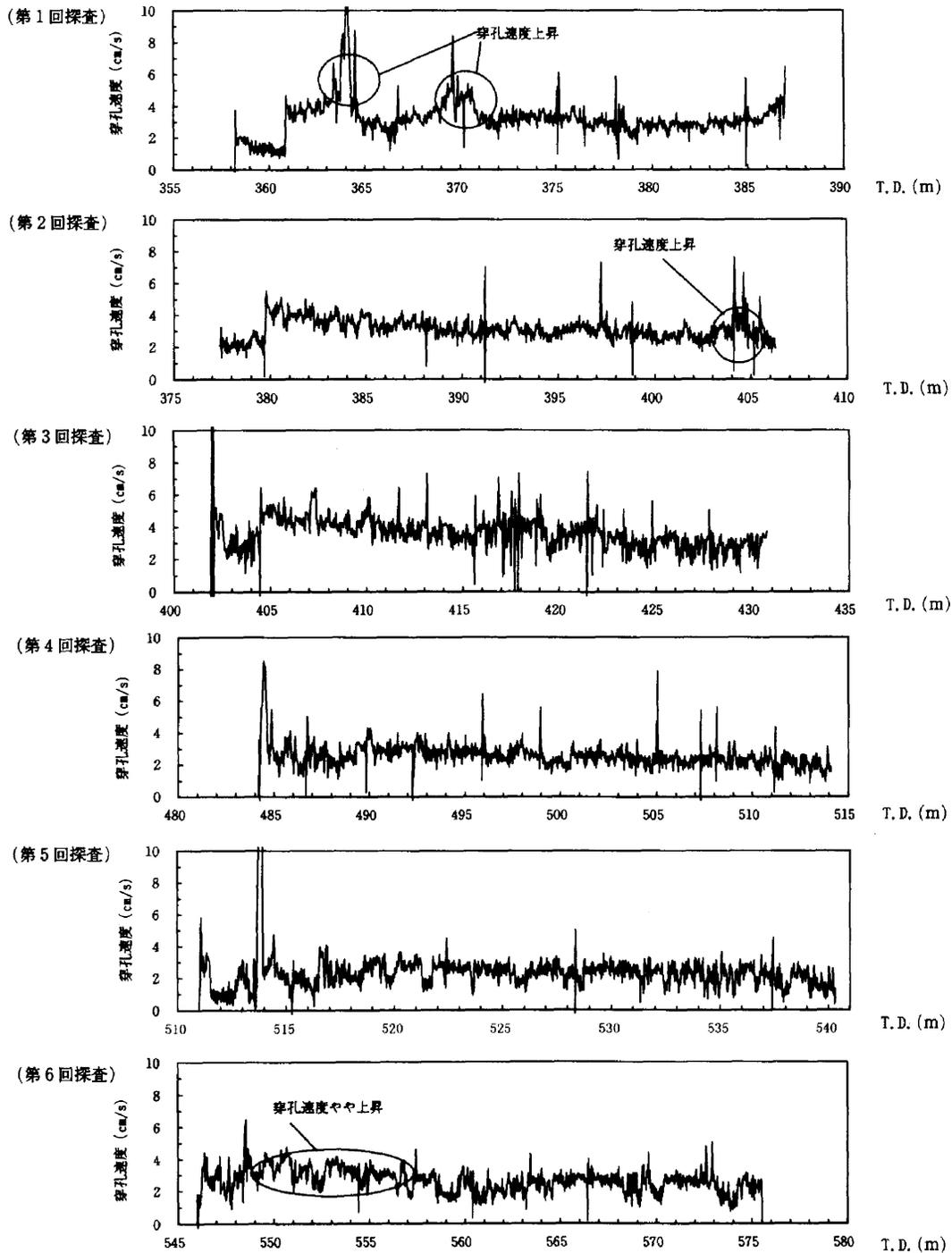


図-8 探査結果 (穿孔速度)

ート層と予測した。

③第3回探査

この区間は前回探査と同様にF-4断層想定区間を含むため、探査はその有無もしくは出現位置を把握することを目的に行った。

穿孔時の削孔水の色およびくり粉の性状については、T.D.405m付近より削孔水の色が暗灰色（探査時の切羽の地質は黒色チャート層）から黒色に変化し、くり粉に頁

岩片が含まれる等の明瞭な変化が認められた。ダンピング圧についてはT.D.417m付近より回転圧の異常上昇に伴うアンチジャミング装置の起動が部分的に認められたものの（例えばT.D.417～418m付近）、全体的には比較的高い値で安定していた。穿孔速度についても顕著な速度上昇も認められなかった。

以上の結果より、この区間の地質性状はT.D.405m付近よりチャート層から砂岩・頁岩混在層に変化するが、予

想されたF-4断層のような脆弱層は認められず比較的安定した岩盤が分布すると予測した。

④第4回探査

この区間の探査は、事前調査で想定されたF-3断層の有無もしくはその出現位置の把握を目的に行った。

穿孔区間のくり粉の性状は全区間にわたって頁岩、砂岩片が一様に認められた。また、ダンピング圧は比較的高い値で安定し、穿孔速度の上昇は認められなかった。

以上の結果より、探査区間の地質性状は比較的安定した砂岩・頁岩混在層であり、F-3断層のような脆弱層は出現しないと予測した。

⑤第5回探査

この区間も、前回とほぼ同様な結果が得られたため、比較的安定した砂岩・頁岩混在層がひろく分布していると予測した。

⑥第6回探査

この区間のダンピング圧の値は、探査初期からT.D.556m付近までの区間において、弱破碎部の予想値ほど低くないものの、若干の低下が認められた。穿孔速度についても、同様の区間において顕著ではないが若干の上昇が認められた。また、探査時の切羽には剥離性に富む頁岩優勢層が分布していたことから、T.D.556m付近までは切羽にみられるようなやや脆弱な頁岩優勢層が分布すると予測した。

3-4 実際の地質との対比

予測結果と実際の地質との対比図を図-9に示す。以

下に、掘削によって明らかになった実際の地質性状と探査結果を比較する。

(1) チャート層 (海沢層)

T.D.360~405m区間には海沢層に属するチャート層の分布が認められた。この中で、T.D.366~371m区間および398~400m区間には赤色粘土を挟むやや脆弱な赤褐色チャート層が出現した。

これらの弱層のうち、前者については第1回探査で識別された弱層 (T.D.363.5~364.5m付近およびT.D.369-371m付近) に対応する。後者については、第2回探査で識別された弱層 (T.D.404~405m付近) に対応すると考えられるが、予測位置と実際の出現位置との間に約6mの差が生じた。この理由としては、探査時に生じた孔曲がり最終的に約7m (水平方向) にもおよんだ事が挙げられる。実際に、切羽で確認された弱層の走向・傾斜をもとに弱層を推定される穿孔位置に投影させたところ、探査によって弱層が識別された位置によく一致した。

また、この弱層は探査によってF-4断層と予想されていたが、その性状や走向および出現位置がF-4断層とは大きく異なっていた。

(2) F-4, F-3断層相当区間

T.D.405~430m区間には砂岩・頁岩混在層の分布が認められた。とくにT.D.405m付近のチャート層との境界部には幅約30cmの白色粘土層が挟在しており脆弱化が著しい。その他の区間では剥離性に富む脆弱な頁岩層中に硬質な砂岩層がブロック状もしくはレンズ状に混在するよ

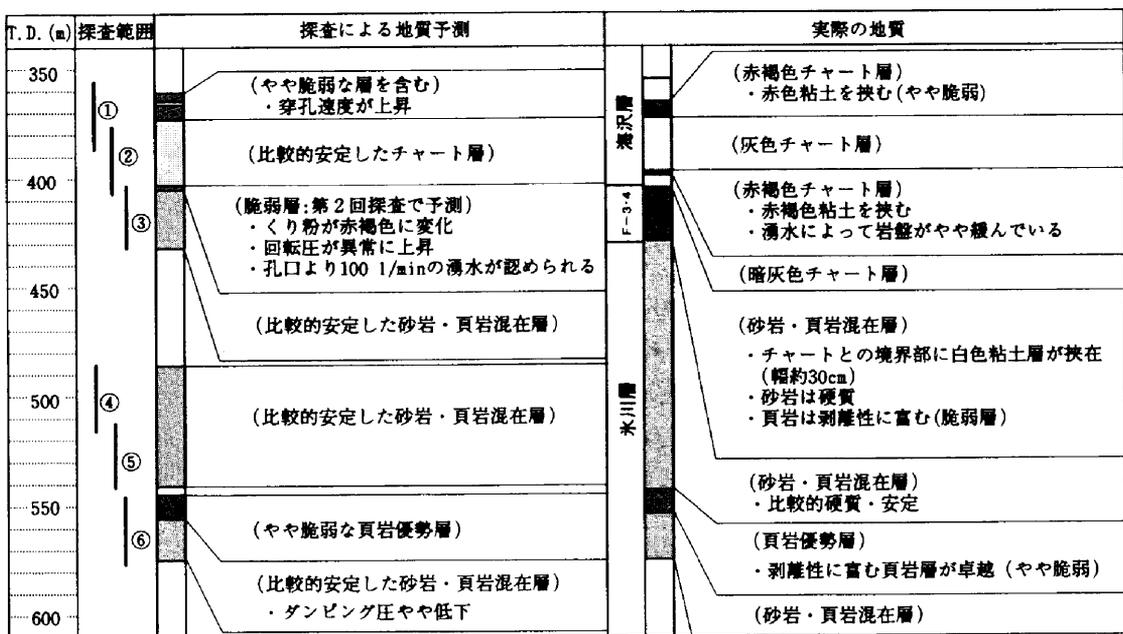


図-9 探査結果と実際の地質との対比

うな岩相を呈する。切羽では砂岩層が頁岩層との境をすべり面にして崩落する現象が頻繁に見られ、やや不安定であった。

この区間は、位置的には事前予想によるF-4断層にほぼ一致する。しかし、岩相の境界（チャート層と砂岩・頁岩混在層）区間を示すという特徴は、F-3（倉沢断層）に近いと思われる。また、図-7に示すようにそれ以降に顕著な脆弱層が認められないことから、この区間にはF-3およびF-4断層が重なって出現したものと思われる。ただし、この区間の地質を砂岩層も含めた岩盤全体として見てみると、それ程強い破碎を受けておらず、当初想定されていたような大規模な断層破碎帯ではなかった。

探査結果を見てみると、くり粉の性状から予想された岩種の結果についてはほぼ一致している。しかし、ダンピング圧および穿孔速度の結果からは比較的硬質で安定した岩盤と予測しており、実際の地質に比べてより硬質側の判断となった。

(3) 砂岩・頁岩混在層（氷川層）

T.D.430m以降の区間には、砂岩・頁岩混在層からなる氷川層が分布している。この地層は、上述の断層区間の地層と構成岩種は同一であるが、全体的に断層区間に比べて砂岩層の割合が多く、切羽が比較的安定している。頁岩層の剥離性も断層区間ほど顕著ではない。ただし、T.D.545～554m区間には、剥離性に富む頁岩層が卓越しており、切羽がやや不安定であった。

この剥離性に富む頁岩層については、第6回探査のダンピング圧低下区間にほぼ一致する。

§ 4. 考察

4-1 孔曲がり対策

本探査で用いた削岩機では、所定の打撃エネルギーを確保するために、フィード圧を5.9MPa (60kgf/cm²) 以上という比較的高圧条件に設定する必要があった。そのため、約30mにも及ぶ長区間穿孔によって孔曲がりが生じる可能性があり、当初より孔曲がりによる探査への影響が懸念されていた。孔曲がり及ぼす探査への影響としては、探査による穿孔距離とトンネルT.D.との間に生じる誤差や、ロッド・継ぎ手と孔壁との摩擦による穿孔速度・油圧（回転圧、ダンピング圧）の変化等が挙げられる。

今回の適用実験では、先にも述べたように第2回探査において水平方向に7mにも及ぶ孔曲がりが生じ、地質脆弱部の位置予測に影響を与えた。一般に孔曲がりの要因としては、フィード圧の高圧設定、ビットの形状、く

り粉の排出不良等が挙げられる。今回の探査では、先に述べた理由によりフィード圧を下げる事が出来ないので、残りの2項目についての対策を行った。まず、ビットの形状についてはボタンビットから孔曲がりし難いと言われているクロスビットに変更した。また、くり粉の排出については鉛直方向の穿孔角度をやや上向き（約5°）にすることにより、排出をより容易にさせた。

その結果、対策を行った第4回探査以降の孔曲がりを2m以下（水平方向）に抑えることができた。

4-2 探査による地質脆弱部の識別

図-8の対比図に示すように、海沢層のチャート層中の脆弱部や氷川層の砂岩・泥岩混在層中の頁岩を主体とする脆弱部について、ダンピング圧および穿孔速度の挙動から精度良く把握することができた。したがって、対象が均質な岩盤中の脆弱部もしくは脆弱部自身が均質である場合には、比較的精度の良い地質性状の予測が期待できる。一方、対象がF-3、F-4断層相当層のように剥離性に富む脆弱な頁岩基質中に硬質岩ブロックが混在しているような岩盤の場合、ダンピング圧および穿孔速度の挙動は何れも硬質岩ブロックの影響をより強く受ける可能性があるため、地質予測には注意を要する。このような地層の識別については、他の予測パラメータ（例えば回転圧など）を利用する方法について今後更に検討していく必要がある。

§ 5. おわりに

今回、穿孔探査の長区間探査への適用性を確認するため、愛宕トンネルにおいて連続適用実験を行った。その結果、探り削孔と同様な簡便さでありながら、より客観的な地質予測が行えた。しかし、同時にいくつかの問題点も明らかになったので、それらについて今後更に検討を進めていく必要がある。

現在、本探査（ダンピング圧の測定）はある特定の削岩機にのみ適用可能であるが、あらゆる削岩機に適用可能なシステムについても開発を進めている。

なお、本研究はドリルマシン（株）との共同研究によって行われたものである。

参考文献

- 1) 山下雅之, 石山宏二, 稲葉 力, 早坂 茂, 塚田純一: 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, トンネル工学研究論文・報告集 (第6巻), pp.107-112, 1996.