

堆積軟岩地山における油圧式削岩機を用いた切羽前方探査とボーリングコアとの比較
THE COMPARISON OF GEOLOGICAL SURVEY SYSTEM USING HYDRAULIC DRILLING TO FACE AND
CORE BORING IN SOFT SEDIMENTARY ROCK

引間 亮一*・石山 宏二*・塚田 純一**・石井 洋司***
Ryoichi HIKIMA, Koji ISHIYAMA, Jyunichi TSUKADA, Yoji ISHII

In tunnel, it is important to predict geological condition of the ahead of face in the considering workability and safety. Because of this, the development of geological survey system ahead of face using hydraulic drilling ("Hydraulic Drilling Survey System") has been advanced. In this paper, first, features of survey result in soft sedimentary rock are described, and the data of survey result and result of core boring and velocity logging carried out using drilling hole by Hydraulic Drilling Survey System is compared.

1. はじめに

山岳トンネルの施工において切羽前方の地質性状を把握する事は、施工性・安全性を考慮する上で極めて重要である。これまで、著者らは、トンネル切羽前方の地山性状を原位置で迅速かつ直接的に把握することを目的に、油圧式削岩機の穿孔油圧データおよび穿孔速度等を利用した切羽前方探査法（穿孔探査法）を開発し、現場に適用してきた^{1,2)}。

今回、穿孔探査を実施したトンネル周辺には、堆積軟岩が分布している。また、炭坑跡が近くにあり、その坑道もしくは炭層払いによると思われる空洞の存在が懸念されていた。このため、切羽から先進コアボーリングが実施されており、本探査は、ボーリングのデータを補うために実施された。そこで本論文では、コアボーリングの結果とその比較的近い位置で実施した探査結果とを比較するとともに、穿孔探査を実施した掘削孔を利用し実施された速度検層のデータも併せて検討を行い、堆積軟岩における穿孔探査結果の特徴について報告する。

2. システム概要

2. 1 穿孔探査システム

穿孔探査システムは、図-1 に示すようにトンネル坑内で削岩機よりフィード圧・打撃圧・回転圧、および穿孔距離を自動計測する計測システムと取得されたデータを現場事務所等において処理・解析する解析シ

* 正会員 西松建設(株) 技術研究所
** ドリルマシン(株)
*** 西松建設(株) 札幌支店

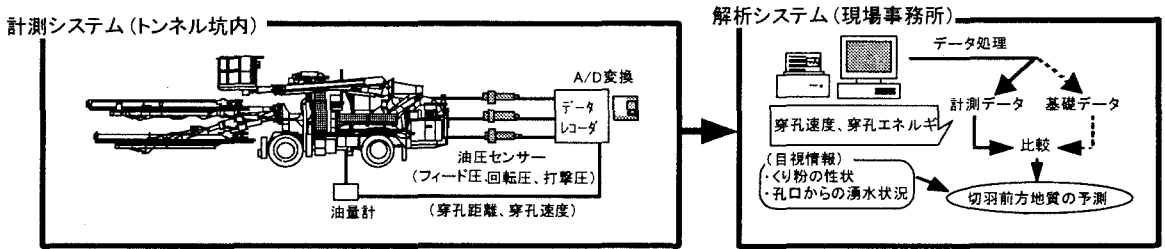


図-1 穿孔探査システム

システムからなる。地山性状の予測は、削岩機より自動計測されるデータ、および人間の目で判断する目視情報のデータを総合的に判断して行う。

穿孔探査の適用方法には、施工時の穿孔データを基に切羽前方数 m 区間の探査を連続的に行う方法と、施工休止時を利用してロッドを継ぎ足しながら切羽前方約 30m 区間の探査を行う方法があり、今回は後者の方法を採用した。

2. 2 地山評価法

今回、現場で使用していた削岩機は、これまで地質性状の予測の指標として用いていたダンピング圧¹⁾が計測できない機種であった。そこで、〈1〉式に示す穿孔エネルギーによる地山評価を行った。

$$\text{穿孔エネルギー } Ed(J/cm^3) = \frac{\text{打撃エネルギー } Ep(J) \times \text{打撃数 } Cp(bpm)}{\text{穿孔速度 } Vd(cm/min) \times \text{孔断面積 } S(cm^2)} \dots \langle 1 \rangle$$

穿孔エネルギーは、単位体積当たりの岩盤を穿孔するのに要したエネルギーを示している。つまり、硬質な岩盤ほど削孔に多くのエネルギーを要するため、穿孔エネルギー値は大きな値を示す特徴を有する。

2. 3 フィード圧による穿孔エネルギーの補正

一般に、穿孔速度と推力（フィード圧）の関係は、推力を増加させると穿孔速度は非線型に増加していくとされている³⁾。しかし、穿孔エネルギーには、フィード圧が考慮されておらず、同一岩種を異なるフィード圧で削孔すると穿孔速度が変わるため、穿孔エネルギーも変化してしまい、地山性状を定量的に評価することができない。したがって、穿孔探査法では一定のフィード圧（例えば 2.94MPa）で削孔を行うこととしているが、探査毎にフィード圧の値は微妙に異なってしまった。そこで、同一の切羽面でフィード圧を変化させて削孔し、穿孔速度とフィード圧の関係を求めた。この穿孔速度とフィード圧の関係を図-2に示す。穿孔エネルギーの算出は、図-2中に示す関係式から穿孔速度を補正し、その値を〈1〉式に代入することにより行った。

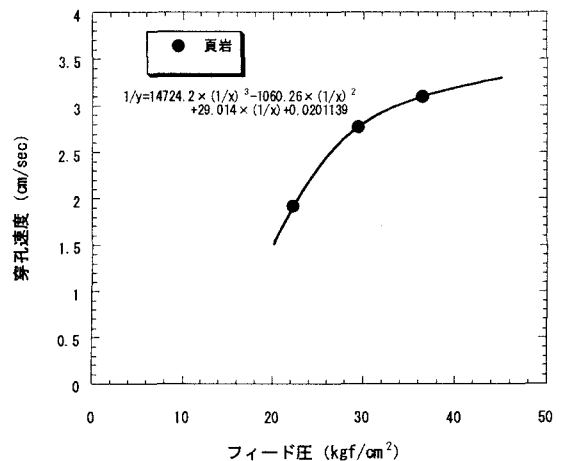


図-2 穿孔速度とフィード圧の関係

3. 軟岩における穿孔エネルギー出力パターン

今回、穿孔探査を適用したトンネルは、NATM 工法で施工中の延長約 1km の道路トンネルであり、地山は、古第三紀石狩層群の美唄層・赤平層と呼ばれる頁岩、砂岩、砂岩・頁岩互層、石炭から構成される比較的均質な堆積軟岩層である。図-3(a)に TD300~310m 区間を探査中に得られた、穿孔エネルギーの出力例を示す。また、同じ頁岩で主に構成されているが、硬質でしかも亀裂質な丹波層を掘削中の道路トンネル(延長約 1.5km) で得られた穿孔エネルギーの出力例を、比較の対象として図-3(b)に示す。両図の比較から、軟岩では穿孔エネルギーがほぼ一様に $200\text{J}/\text{cm}^3$ と低く、バラツキも少ないが、逆に硬岩では変動、およびバラツキが大きいとともに、平均値も軟岩に比べて大きいことがわかる。このような両者の差異は、岩の強度とそれに伴う亀裂の影響によるものと推定される。

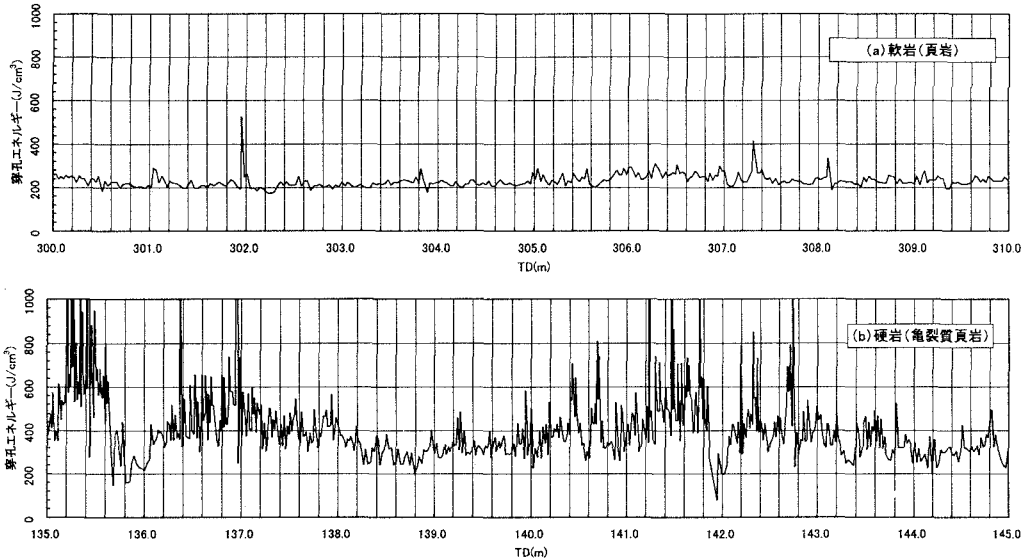


図-3 軟・硬岩における穿孔エネルギーの出力パターン例

4. ボーリング調査結果と穿孔エネルギーとの比較

切羽から先進コアボーリングを実施した地点とほぼ同じ位置で実施した計 7 回の探査結果を基に、穿孔エネルギーとボーリング調査で実施された各種試験の結果および岩盤分類との比較・検討を行った。なお、切羽面での穿孔探査を行った位置とボーリングの位置が異なるため、コアから求めた走向・傾斜にしたがい、深度方向の位置を補正した。

(a) 岩盤分類との関係

ボーリングコア観察結果に原位置試験(孔内水平載荷試験、速度検層)や室内岩石試験試験(一軸圧縮試験、超音波速度試験)の結果を加えて行った岩盤分類とその分類に対応する区間での 1m 毎の穿孔エネルギーの平均値との関係を図-4 に示す。図から穿孔エネルギーの底値は、どの分類においても $200\text{J}/\text{cm}^3$ 程度であるが、穿孔エネルギーの高いところで見ると、概ね C 級と D 級の区別が付き、C 級の

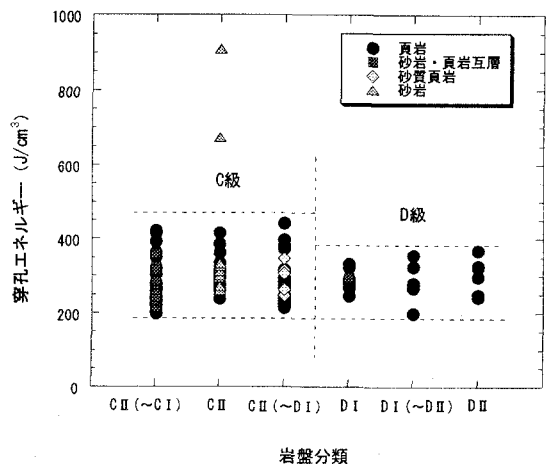


図-4 岩盤分類と穿孔エネルギーの関係

方がより穿孔エネルギーが大きい区間を多く含み削孔にエネルギーを要したことがわかる。また、図-5に穿孔エネルギーと実施支保パターンとの関係を示す。実施支保パターンの選定は、先の岩盤等級に切羽観察結果を加味して行われた。その結果、岩盤等級との関係に比べて、実施支保パターンの方がより穿孔エネルギーとに関連していることがわかった。

(b) RQD との関係

ボーリングコアの RQD とそれに対応する区間の穿孔エネルギーの平均値との関係を図-6 に示す。図から穿孔エネルギーは、RQD の値に関係なく 200 ~ 400 J/cm³ の範囲にほぼ一様に分布している。これは、探査を行った区間が軟岩の層であるため、RQD が高く亀裂の少ない区間においても岩盤の強度が低いため、本来なら強度が低下する RQD が小さく亀裂の多い区間と比較しても穿孔エネルギーに関して差が現れなかった、つまり、軟岩においては、穿孔エネルギーに対して RQD はほとんど寄与していないものと考えられる。

(c) 原位置試験結果との関係

ボーリング孔で実施した孔内水平載荷試験から求めた変形係数と孔内水平載荷試験を行った区間に対応する穿孔エネルギーの区間平均値との関係を図-7 に示す。結果として、孔内水平載荷試験を実施した回数が少ないこと、また、試験箇所と探査位置が同じでない等から両者の相関係数は小さいが、図から穿孔エネルギーと変形係数には正の相関が見て取れる。孔内水平載荷試験から求められた変形係数は、原位置での亀裂や岩盤の緩みなどの影響を含んだ変形特性を表していると考えられる。このことから、穿孔エネルギーは、地山性状を表す指標になると考えられる。

5. 速度検層結果と穿孔エネルギーの関係

穿孔探査を行った際の掘削孔を利用して、速度検層を実施した。速度検層は、切羽でハンマー打撃により起振し、掘削孔の坑口部と掘削孔内の所定の位置 (1m 毎) に設置された 2 個の受振器により振動を検出し、初動の伝播時間の差から各区間の弾性波速度を把握するものである。穿孔探査と速度検層を実施した区間の走時曲線を図-9(a)に、穿孔エネルギーを図-9(b)に示す。図(b)から、砂質頁岩、および頁岩の区間

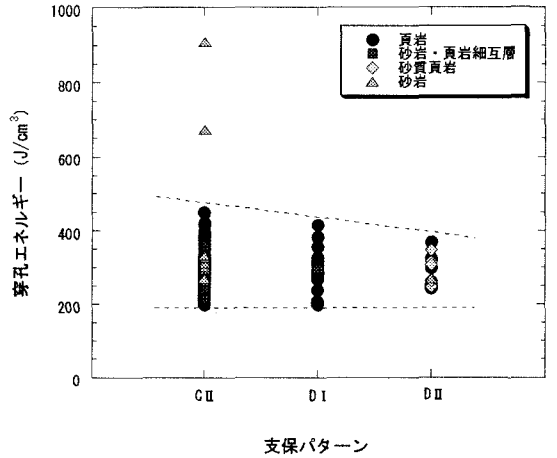


図-5 実施支保パターンと穿孔エネルギーの関係

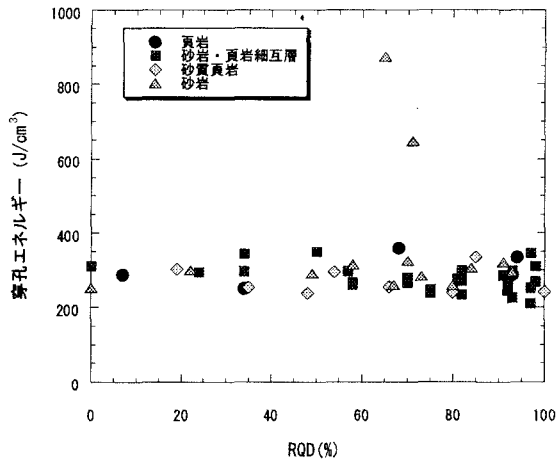


図-6 RQD と穿孔エネルギーの関係

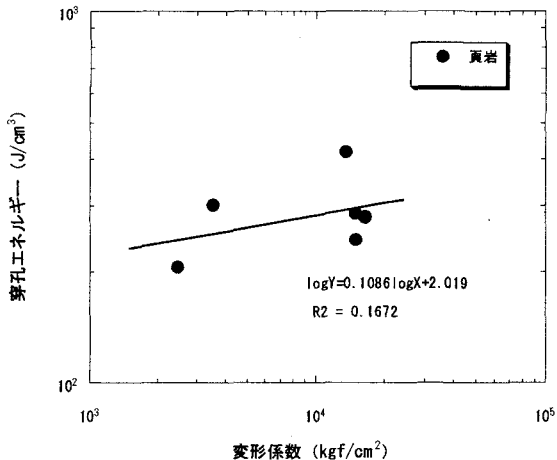


図-7 変形係数と穿孔エネルギーの関係

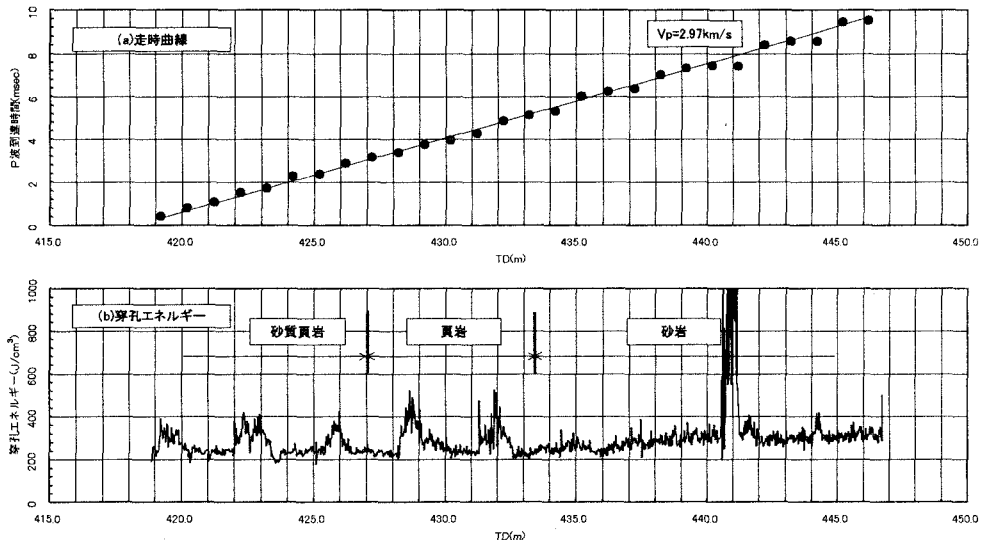


図-9 探査深度方向の弾性波速度および穿孔エネルギーの変動

で穿孔エネルギーが高くなっている区間が見られる。また、砂岩の区間においてもわずかだが穿孔エネルギーが高くなる区間がある。この区間を図(a)の走時曲線と照らし合わせてみると、探査深度が浅いところでは、計測機の分解能、読みとり誤差等により、傾向は顕著に現れてはいないが、この区間全体としては実線より傾きが小さく、弾性波速度が速くなっていることがわかる。つまり、この削孔区間において、局所的に穿孔エネルギーが高くなるような硬く、弾性波速度の速い礫質部が存在したと考えられ、言い換えれば、このような穿孔エネルギーの出力が見られた場合、硬質部あるいはその境界の存在が示唆されていると考えられる。

6. まとめ

堆積軟岩層において実施した穿孔探査より選ばれた穿孔エネルギーとボーリング調査項目の各種試験、および穿孔探査を実施した掘削孔での速度検層の結果を比較して、以下の知見を得ることができた。

- ・岩盤分類で地山が良いほど穿孔エネルギーの大きな区間を多く含み、穿孔エネルギーが岩盤分類の指標になりうる可能性がある。
- ・堆積軟岩層において、穿孔エネルギーに対し、RQD はほとんど寄与していない。
- ・穿孔エネルギーと変形係数には相関が見られ、穿孔エネルギーは原位置の地質性状を表していると考えられる。
- ・堆積軟岩層において、急激に穿孔エネルギーが大きくなる区間がある場合、礫等の硬質部がそこに存在する可能性がある。

今後は、より多くの岩種・岩級の地山で適用し、データの蓄積を行い、穿孔エネルギーと岩盤分類の関係を把握していく必要がある。

参考文献

- 1) 山下, 石山, 稲葉, 早坂, 塚田: 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), pp107-112, 1996.
- 2) 山下, 石山, 稲葉, 塚田, 森田: 穿孔探査法と坑内弾性波反射法を組み合わせた切羽前方探査法, トンネル工学研究論文・報告集 (第7巻), pp225-230, 1997.
- 3) 日本材料学会: 岩盤力学とその応用, p.332.