



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



削孔機械量データによる坑道天盤地層構造の推定に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2012-01-30 キーワード (Ja): 一軸圧縮強度, 削孔, 岩石切削理論, 機械量データ, 有数体積比エネルギー キーワード (En): unconfined compressive strength, drilling, rock cutting theory, mechanical data, effective specific energy 作成者: 李, 占涛 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00005086

博士学位論文

削孔機械量データによる坑道天盤地層構造の推定に関する研究

室蘭工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

李 占涛

2011年9月

Research on the Prediction of Roof Geostructure Using Drilling Mechanical Data

ABSTRACT

An analytical model for drilling process was proposed to describe the relations among physical properties of the rocks and mechanical data. Based on this model, a drilling system was developed. This drilling system can measure the mechanical drilling data and predict the geological conditions.

1) Development of the analytical model for rock drilling.

In this analytical model, a drilling process is divided into continuous cycles, each of which includes two motions: feeding and cutting. Feeding is treated as an indentation motion. A linear relation exists between indentation pressure (thrust) and the indentation depth (penetration rate). Cutting forces and frictions of both the rake face and the flank face are examined. Especially, a virtual base is set to the model to simulate the contact surface between the flank face of the bit and the rock.

Some relations among rock properties, bit shapes, and drilling parameters (rotary speed, thrust, torque, and stroke) were deduced. According to this model, drilling torque consists of four parts generated from cutting, friction, feeding, and idle running respectively. Similar to torque, specific energy also has four parts from cutting, friction, feeding, and idle running respectively.

For this study, the effective specific energy is defined as the sum of specific energy consumed by cutting and feeding. It is more useful to evaluate uniaxial compressive strength (UCS) than other parameters are.

2) Development of the drilling system.

The hardware of this system consists of a drilling machine (Trussmaster Series) and some instruments to measure mechanical data. The software can analyze the data from the mechanical data and predict the geostructure of roadways, rock physical properties and discontinuities of the strata.

3) Laboratory and field experiments.

Some laboratory tests and field experiments were performed to verify the usefulness and effectiveness of the proposed model and the drilling system. With the mechanical data, the rock physical properties were evaluated. Meanwhile, the specimens taken from the fields were tested in laboratory to get their physical properties. The predicted values were agreed with the measured values.

4) Visualization of the geostructure.

An application of VRML (virtual reality modeling language) was developed to display the predicted geostructure of roadway in 3D. The strata and the discontinuities (cracks, boundary faces, etc.) can be displayed.

The results of this study show that the drilling system is useful and feasible. Our future work is to improve the prediction precision and to apply the drilling model to other types of drilling machines.

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 既往の研究.....	3
1.2.1 MWD 技術について.....	3
1.2.2 小型削孔機用計測装置 MWD に関する研究.....	4
1.2.3 地層性質と削孔機械量データの関係に関する研究.....	7
1.3 研究目的.....	18
1.4 論文の構成.....	19
参考文献.....	20
第2章 回転削孔メカニズム.....	25
2.1 はじめに.....	25
2.2 西松理論の概略.....	28
2.2.1 切削過程.....	28
2.2.2 力学モデル.....	28
2.3 削孔分析モデルの提案.....	30
2.3.1 削孔過程の観察.....	30
2.3.2 切削力の変化について.....	34
2.3.3 削孔過程のモデル化.....	34
2.3.4 西松の切削モデルの拡張による切削運動の分析.....	36
2.3.5 Mateus の理論とビットの送り運動の分析.....	37
2.3.6 削孔のトルク.....	39
2.3.7 削孔体積比エネルギー.....	40
2.4 削孔理論がダイヤモンドビットへの適用.....	42
2.5 本章のまとめ.....	42
参考文献.....	43
第3章 室内削孔試験.....	45
3.1 はじめに.....	45
3.2 室内 MWD 装置のハードウェアシステム.....	45
3.3 ソフトウェアシステム.....	47
3.4 室内削孔試験結果.....	52
3.4.1 推力の変動による機械量諸元の変動傾向.....	52
3.4.2 削孔トルクと一軸圧縮強度の関係.....	52
3.4.3 逃げ面（仮想底面）の面積がトルクに与える影響.....	52
3.4.4 削孔体積比エネルギーと一軸圧縮強度の関係の検証.....	55

3.4.5 境界面と亀裂の検出について	59
3.5 本章のまとめ.....	62
参考文献.....	63
第4章 天盤検層用削孔システムの開発	65
4.1 はじめに.....	65
4.2 天盤検層用削孔システムのハードウェア	65
4.3 天盤検層用削孔システムのソフトウェアシステム	72
4.4 本章のまとめ.....	81
第5章 現場適用試験.....	83
5.1 はじめに.....	83
5.2 Trussmaster Mark II の工場試験	83
5.2.1 試験概要	83
5.2.2 不連続面位置の検出.....	88
5.2.3 地層構造の可視化.....	90
5.3 釧路コールマインにおける Trussmaster Mark I の現場試験.....	91
5.3.1 試験概要	91
5.3.2 不連続面位置の検出.....	96
5.4 豪州 NRE 炭鉱の RTV における Trussmaster Mark II の現場試験.....	98
5.4.1 試験概要	98
5.4.2 体積比エネルギーと一軸圧縮強度について	100
5.5 豪州 NRE 炭鉱の Adit20 坑道における現場削孔試験	106
5.5.1 試験概要	106
5.5.2 一軸圧縮強度の推定	109
5.5.3 一軸圧縮強度の可視化表示.....	111
5.5.4 不連続面位置の検出.....	112
5.6 本章のまとめ.....	114
第6章 総括	115
6.1 本論文のまとめ.....	115
6.1.1 回転式削孔機を用いた切削型ビットの削孔分析モデルの構築.	115
6.1.2 室内削孔実験による削孔分析モデルの検証	116
6.1.3 天盤検層削孔機の開発	116
6.1.4 天盤検層削孔機の工場試験と現場試験.....	117
6.2 今後の展開	117
謝辞.....	119
付録.....	121
付録1 岩石物性値の測定方法について.....	121

1) 物性試験の流れ	121
2) 試験設備と試験条件	121
付録2 本研究で用いたニューラルネットワーク	125
付録3 現場実験条件と記録	130
参考文献	132

第1章 序論

1.1 研究背景

19世紀に入ってから、人口の増加と経済発展により、世界のエネルギー消費量の増加には目を見張るものがある。石油や石炭、天然ガスなどの化石燃料を主なエネルギー源として、現代社会の発展を支えている。

2010年版のビーピー社（BP p.l.c.）の統計によると、2009年世界の総エネルギー消費量のうち、34.8%は石油、29.4%は石炭が占めている（Figure 1.1）。石油の消費量は依然として1位で、もっとも重要な資源であるが、同社の統計によると、2009年全世界石油の確認埋蔵量を当該年度の生産量で割った可採年数は、僅か45.7年ぐらいであり、天然ガスの可採年数は、62.8年程度でありながら、石炭の埋蔵量は石油と天然ガスより豊富で、可採年数は119年に達する（Figure 1.2）。すなわち、今後石炭は石油代替エネルギーの重要な柱として持続的に利用できるエネルギー資源と考えられている^{1.1)}。

石炭を採掘する手法は露天掘と坑内掘の2種類がある。世界石炭協会（World Coal Institute）によると、坑内掘生産量は世界の石炭総生産量の60%を占める^{1.2)}。坑内掘において、技術的な問題はたくさん存在するが、一番解決すべき問題は、天盤の崩落事故である。落盤災害は岩盤が破壊し、それが広がることにより起こる。落盤災害は、ガス爆発災害のように一度の発生により数十から百人以上といった多数の犠牲者が発生する災害ではないが、坑内掘炭鉱では頻繁に起こる災害であり、年間を通して見ると多数の死亡者、罹

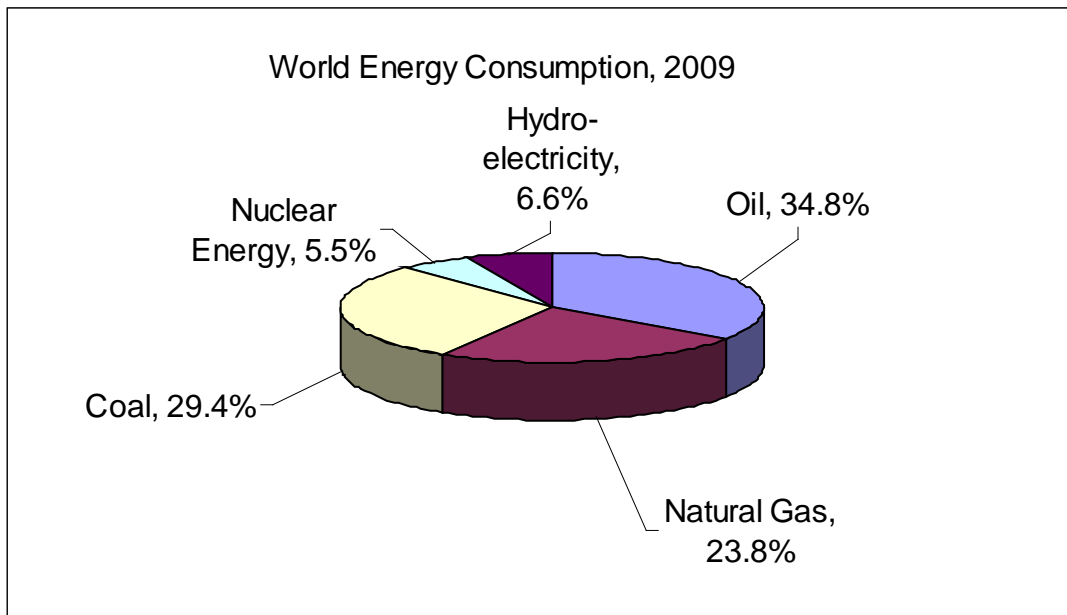


Figure 1.1: 2009 world energy consumption (BP 2010)^{1.1)}

Reserves-to-Production Ratios, 2009

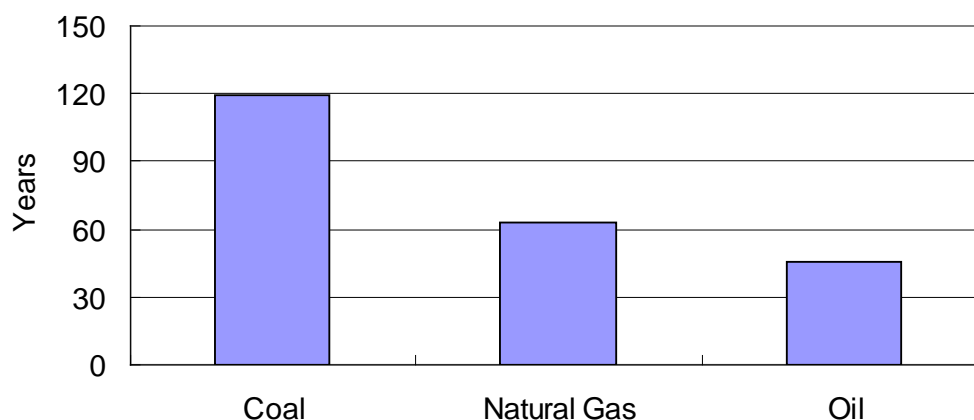


Figure 1.2: Global reserves-to-production ratios, 2009^{1.1)}

災者が発生している。例を挙げると、1950年~2003年の間で、中国の炭鉱の落盤事故件数は、総災害件数の49.9%を占め、死亡者数は総死亡者数の35.7%を占める^{1.3)}。中国煤炭科学総院によると、2001年~2006年までの炭鉱の落盤事故件数は、総災害件数の55%を占め、死亡者数は総死亡者数の43%を占め、事故別の死亡率が一番高い^{1.4)}。2008年の中国全体の炭鉱における災害件数は1954件、死亡者数3215名であり、そのうち落盤事故は1032件(52.8%)、死亡者数1222名(38.0%)であった^{1.5)}。2009年については、中国全体のデータは入手できなかったが、山東省では、死亡事故が5件、死者6名、うち落盤事故件数が3件(60%)、死者が4人(67%)であった^{1.6)}。先進国では死亡者数はかなり少なくなっているが、米国の2006年から2010年までの5年間における坑内掘炭鉱死亡者数100名のうち14名(14%)^{1.7)}、豪州の1998年7月~2008年6月の10年間における坑内掘炭鉱死亡者数15名のうち6名(40%)が落盤災害によるものである^{1.8)}。近年、アメリカでは、死者数が著しく下がったが、毎年数百人の負傷者が出ているので、依然として落盤災害が深刻な問題であるが分かる^{1.9)}。また、露天掘から坑内掘への移行が進みつつあるインドネシアにおいても、天盤が軟弱であり、しばしば落盤事故により生産活動が妨げられている。

炭鉱の支保工では、落盤事故を防止するために、支保用ロックボルトが広く施工されている。ロックボルト支保が注目される理由は、経済性と効率がよいからである。アメリカとオーストラリアでは、ほとんどの坑内炭鉱にロックボルト支保を利用している^{1.10) 1.11)}。中国では、70%の炭鉱が天盤ロックボルト支保を利用し、大手企業の90%が利用している^{1.12)}。イギリスでは、伝統的にアーチ式鋼柱支保を用いていたが、1990年代から、ロックボルトが主流になっている^{1.13)}。

ロックボルト支保の施工においては、ボルトの種類や、本数、レジンの種類を決めるために、天盤の地質構造や岩盤物性値、岩石物性値を把握することが不可欠である^{1.14)}。特に、天盤地層の境界面や亀裂の分布、岩石の一軸圧縮強度は支保工施工に重要である。

地質調査の方法は様々である。炭鉱を開発する前には、鉱区の岩種や地質構造、断層などを地表地質調査により、把握することができる。また、ボーリング調査を行い、岩質、岩盤の不連続性（RQD）、地下水状況を大雑把に推定でき、その後、ボーリングコアから試料を作製し、室内力学試験を通じて、強度や弾性波速度、硬度など力学性質を計測する。また、弾性波探査や、電気探査、電磁探査なども併用され、地層の詳細な構造を推定している。これらの調査と試験は、炭鉱の地質構造や岩石の物理性質、力学性質を大雑把に推定できる。しかし、実際の地層構造は極めて複雑で、岩層の種類や、厚さ、亀裂、境界面など不連続面の分布状況が場所によって変化する。そのため、施工段階での地質観察や調査が不可欠である。

前述のように、ロックボルトは世界全体で主要な支保になりつつある。ロックボルトの施工では、坑道に沿ってロックボルト孔が削孔される。もし、このような多数のロックボルト孔が削孔される時、削孔機の機械量を計測できれば、その機械量データから、天盤地質状況の推定が可能になり、天盤状況に合わせた支保対策を施すことにより、落盤事故を軽減できると考える。そのため、近年、炭鉱や鉱山、トンネル等でロックボルト孔を削孔する時に、削孔機械量を計測したり、岩層の特定や亀裂の分布、岩石の物性値の推定を行なうシステムの研究開発が注目されている。以下には、ロックボルト孔の削孔に限らず、岩盤工学分野における削孔計測システムとその研究の現状を概観する。

1.2 既往の研究

1.2.1 MWD 技術について

ロックボルト施工においては、最初にロックボルト孔を削孔する。その際の削孔機械量データは地層や岩盤の性質を反映すると考えられる。この発想から、原位置で地層構造や岩盤の性質を推定するために、MWD(Measurement While Drilling の略称)システムの開発が行なわれてきた^{1,15)}。

MWD は削孔中に機械量をリアルタイムで計測することを意味し、石油開発に伴って生まれた。計測装置をビット近傍に配置し、計測したデータを地上に転送する。計測データは、電気抵抗率やガンマ線、方位、傾斜、圧力、トルクと温度などの孔底情報である。データの転送方法は、有線式のステアリングツールと無線のマッドパルス式と電磁波式がある。近年、音響信号による転送に関する研究や開発も行なわれている。典型的な MWD システムの構成は Figure 1.3 に示すように、孔底センサやデータ転送装置、地表のデータ受信装置とデータ解析モジュールからなる^{1,16) 1.17) 1.18)}。

MWD システムは石油とガス開発に幅広く適用されており、根本的なコンセプトは本研究で開発を目指す小型削孔機の機械量データ計測と同じであるが、炭鉱やトンネルなど施工に直接応用することは困難である。石油開発では、削孔の深さは数キロメートルに達するため、ビットの方位や傾斜、温度、岩種などの情報を得るためには、センサは必ずビッ

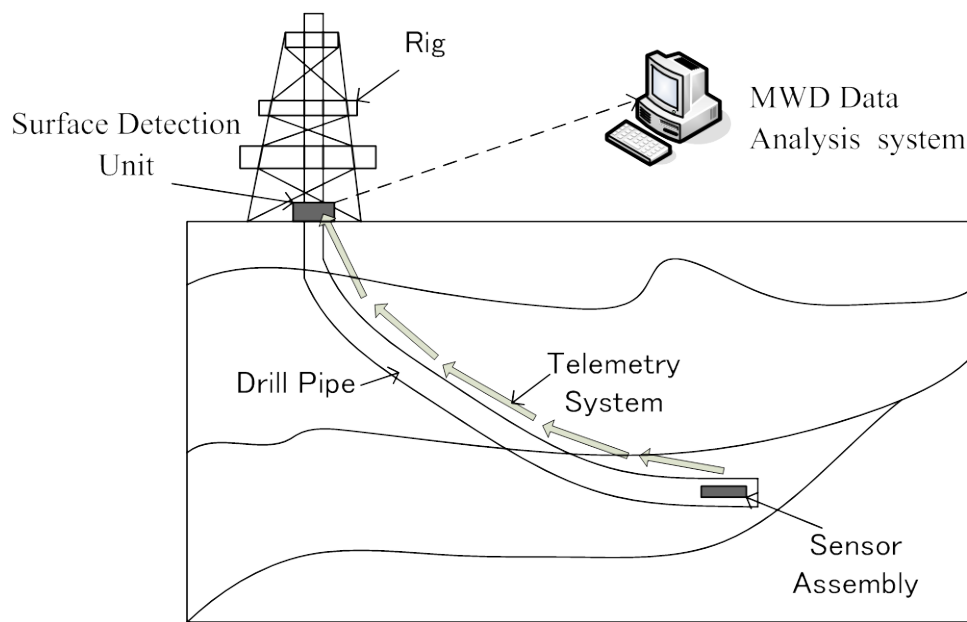


Figure 1.3: Concept diagram of a MWD system

ト近傍に取り付けなければならない。データを地上に伝送するシステムや地表のデータ受信装置なども必要である。そのため、MWDシステムは高価であり、そのまま小型削孔機の機械量データ計測に転用することはできない。さらには、小型削孔機のビットは直径が小さく、石油掘削のMWDシステムのようにビット近傍にセンサを配置したり、伝送システムを組み込むのが困難である。

1.2.2 小型削孔機用計測装置 MWD に関する研究

MWD 技術の発達により、1970 年代から土木や炭鉱、鉱山の削孔に機械量計測を導入し、天盤構造を推定する開発が行なわれるようになった。記録とデータの解釈など機能を含める天盤検層システムに関する研究は盛んになっている。本研究では、炭鉱天盤検層用 MWD のコンセプトを Figure 1.4 に示す。システムのハードウェアは機械量の計測装置、記録装置とデータ解析装置から構成されている。計測装置は、推力や圧力、トルク、ビット位置、削孔速度、回転数などを計測するセンサである。記録装置としては、USB メモリなどの記憶媒体を使用する。データを解析するためにはコンピュータが必要である。システムのソフトウェアは、ハードウェアで取得した機械量データを解析し、削孔切削理論や経験式により、天盤の地層構造や不連続面、岩石の物性値などを推定したり、結果を表示したりする機能を実現する。言い換えれば、ハードウェアはデータを取得し、ソフトウェアはデータを解釈する。

Howie et al.^{1,19)}の研究グループは、ロックボルト孔の削孔において、削孔パラメータ（推力、トルク、削孔速度と回転数）を計測し、削孔体積比エネルギーと削孔速度を計算できるシステムを開発した。システムは天盤削孔機に取り付け、比エネルギーと削孔速度をリアル

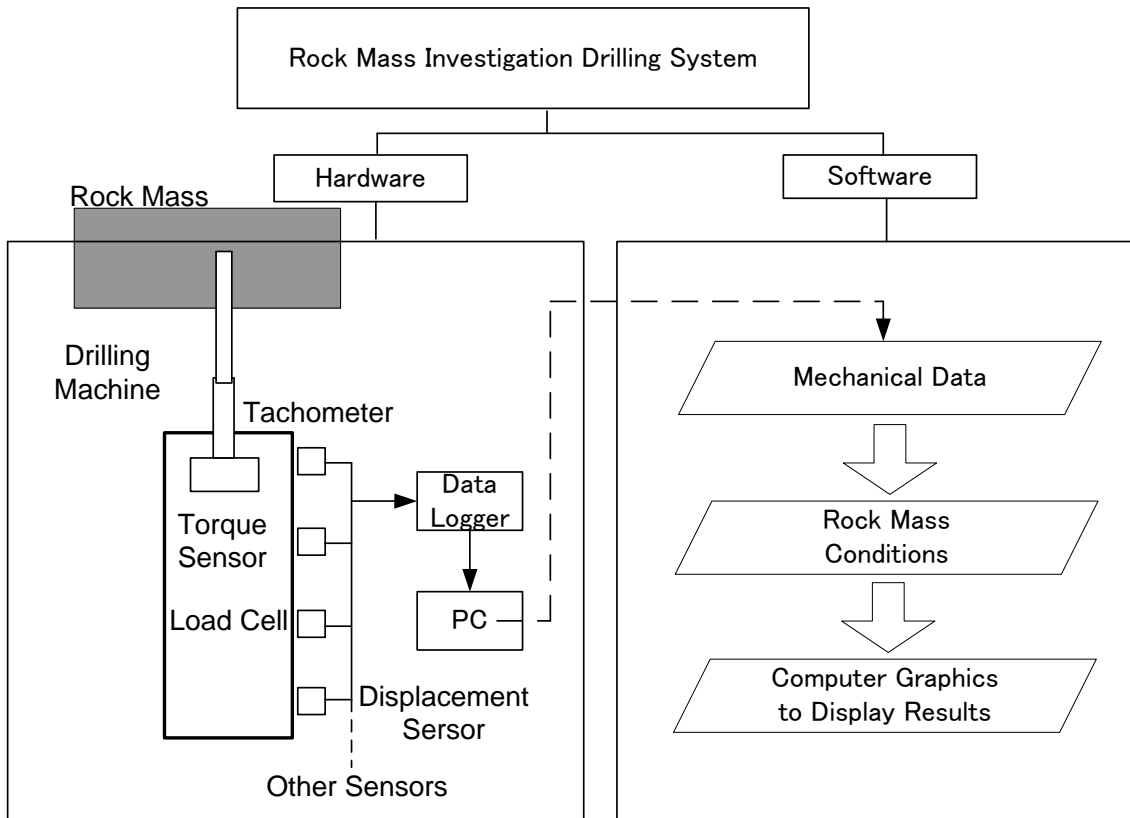


Figure 1.4: Concept diagram of a typical MWD system

タイムにユーザーに提示する。パソコンを用いることにより、重要な削孔パラメータをリアルタイムに解釈や分析することができ、オペレーターに危険な天盤状況（例えば空洞、地層変化）を知らせることを可能にする。また、データは、取り外し可能な半導体メモリデバイスにダウンロードさせることができる。ガスのある炭鉱坑内でも使用可能なように、本質安全部品で構成されている。しかしながら、このシステムでは、岩石物性値の推定が言及していない。

Gui et al.^{1.20) 1.21)}は、土壌の削孔において、回転式削孔機をベース機として、トルクや推力、マッド圧力、回転数、削孔速度などの機械量を計測できる削孔システムを開発した（Figure 1.5）。推力と回転数が一定な場合、削孔速度とトルクが土層の識別に有効なパラメータであると明らかにした。削孔手順や削孔パラメータを安定化することにより、地層の変化を定性的に推定できることを示した。しかし、Gui et al.の研究では、土壌の削孔のメカニズムが未解明であるので、既往の経験式を利用した。また、Gui et al.のシステムでは、削孔パラメータから土の非排水強度を定量的に推定することは困難である。

J. H. Fletcher & Company と West Virginia University の研究チームは天盤ロックボルト削孔モニター（Flecture Information Display system）を開発した。Finfinger et al.^{1.22)}はこのモニ

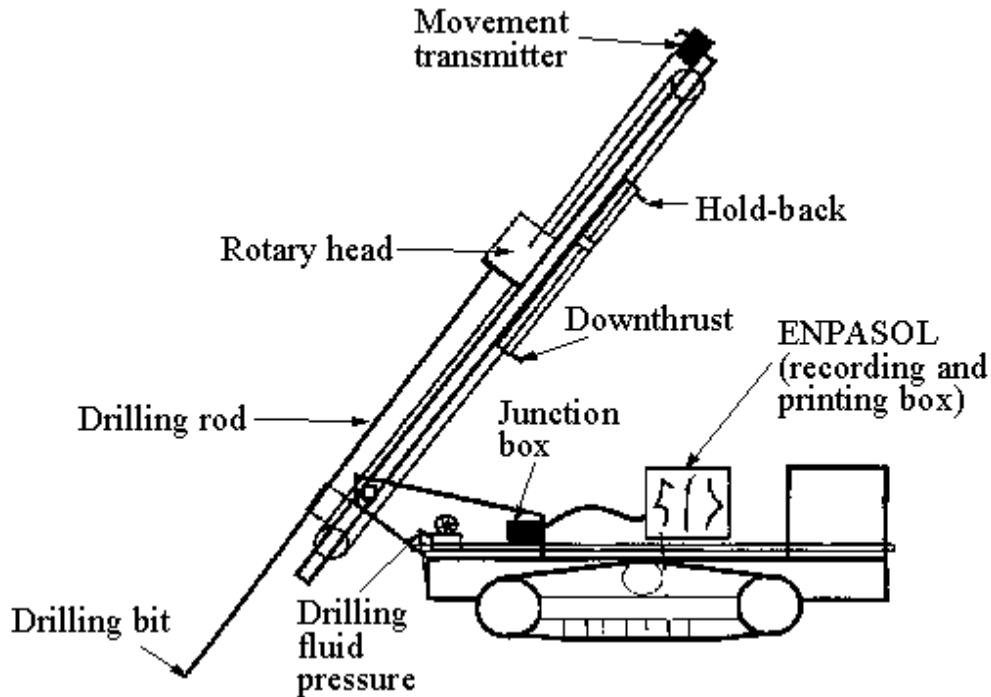


Figure 1.5: A typical instrumented rotary drilling machine that can be used to drill at various drilling angle^{1.20) 1.21)}.

ターを用いて、室内試験を行ない、岩石の一軸圧縮強度と体積比エネルギーの線形関係を検証した。Anderson et al.^{1.23)}はモニターを改善し、天盤構造をリアルタイムに推定し、マッピングするシステムを開発した。また、炭鉱で使用するために、防爆化も実現した。Anderson et al.の研究では、ソフトウェアを開発し、天盤の岩石硬度や空洞、不連続面などを表示することができる。ボアホールスコープを用いて孔内を観察し、システムの計測結果を検証した。また、Gu^{1.24)}はシステムのアルゴリズムを再検討し、削孔硬度 (Drilling Hardness, DH) の概念を提案した。削孔硬度の変化により、境界面や亀裂など不連続面を検出できると報告している。また、PDA (Prediction Discriminant Analysis) 手法を用いて、推力や削孔速度、トルク、回転数と削孔硬度から岩種を推定している。しかし、Gu は一軸圧縮強度の推定を報告しない。

Utt et al.^{1.25)}のチーム (Spokane Research Laboratory) は本質安全な削孔モニターを構築し、ニューラルネットワーク手法の1つである自己組織化マップを用いて、体積比エネルギーと削孔速度により、準即時的に地層強度分類を行なうシステムを開発し、室内試験で検証している。地層強度分類と空洞の識別が可能である。しかし、不連続面の検出に関する結果は見出せていない。

Yue^{1.26)}のチームは、回転-パーカッション式削孔機用削孔モニター (Drilling Process Monitor, 略称 DPM) を開発し、削孔速度から岩層種類を推定していると報告した。削孔機の動作を、機械量の閾値により切削動作と6つの補助動作 (Pushing in 押し込む, Pulling back 引戻し, Flushing 洗孔, Tightening 締め付け, Un-tightening 緩め, Stoppage 停止) に分け、機械量から動作のタイプを自動的に識別する方法を提案した。これにより、有効削孔

時間（補助動作の時間を除く）をモニターしている。しかし、物性値を定量的に推定することができていない。

1.2.3 地層性質と削孔機械量データの関係に関する研究

本研究では、炭鉱における岩盤や土、石炭、鉱物などからなる集合体を「地層※」と呼ぶ。場合によって、天盤や地盤、岩盤、岩層とも呼び、これらが削孔の対象である。

また、本研究では、「地層性状」の中に、以下の地質的な特性、物理学的あるいは力学的性質と鉱物の性質を含める。

- 1) 岩種や、節理、亀裂、割れ目など地質的な特性。
- 2) 岩石や土、鉱物の物理的あるいは力学的性質。

- 物理的性質としては、
 - * 密度 (density),
 - * 空隙率 (porosity),
 - * 含水率 (water contents),
 - * 浸透率 (permeability),
 - * 弾性波速度 (elastic wave velocity)

などがある。

- 力学的性質としては、
 - * 圧縮強度 (compressive strength),
 - * 引張強度 (tensile strength),
 - * 衝撃強度 (impact strength),
 - * せん断強度 (shearing strength),
 - * 硬度 (hardness),
 - * 弾性率 (modulus of elasticity)

などである。一方で、

- * 削孔性 (drillability) ,
- * 発破性 (blastability) ,
- * 採炭速度 (ploughability) ,
- * 岩石の切削速度 (cutability)

の指標も含まれる。

※地質学用語の地層は「成層した堆積物また岩体の総称。一般に堆積岩または堆積物をさすが、層状を示す溶岩等の火山岩類も含めることがある」と定義をされている。（土木用語大辞典，社団法人土木学会編，技報堂出版(1991年)，pp. 814.）

3) 鉱物的性質. 例えば, 構成している鉱物, 結晶あるいは粒子の種類, 大きさと配列の状況などによる組織と構造の特性である^{1,27)}.

また, 本研究で用いる「機械量」には, 回転数, 推力, 削孔速度とトルクのような「基本パラメータ」だけでなく, 1回転あたりの削孔深さ(以下削孔深さ(mm/r)と呼ぶ)と体積比エネルギーのような「組み合わせパラメータ」も含める.

最後, この機械量に影響を与える要因としては, 地層性状だけではなく, 削孔機の種類, ビットの形状と磨耗量, 給水量, オペレータの操作習慣などがある. Figure 1.6は, 機械量とそれに影響する主な要因を示している.

一般的には, 地層性状により削孔機械量は変動することが知られている. 例えば, 軟質な岩石より, 硬質な岩石の削孔に要するエネルギーは高くなる. しかし, 両者の関係を定量的に評価することは容易ではない.

次に, 地層性状と機械量に関する既往の研究について述べる.

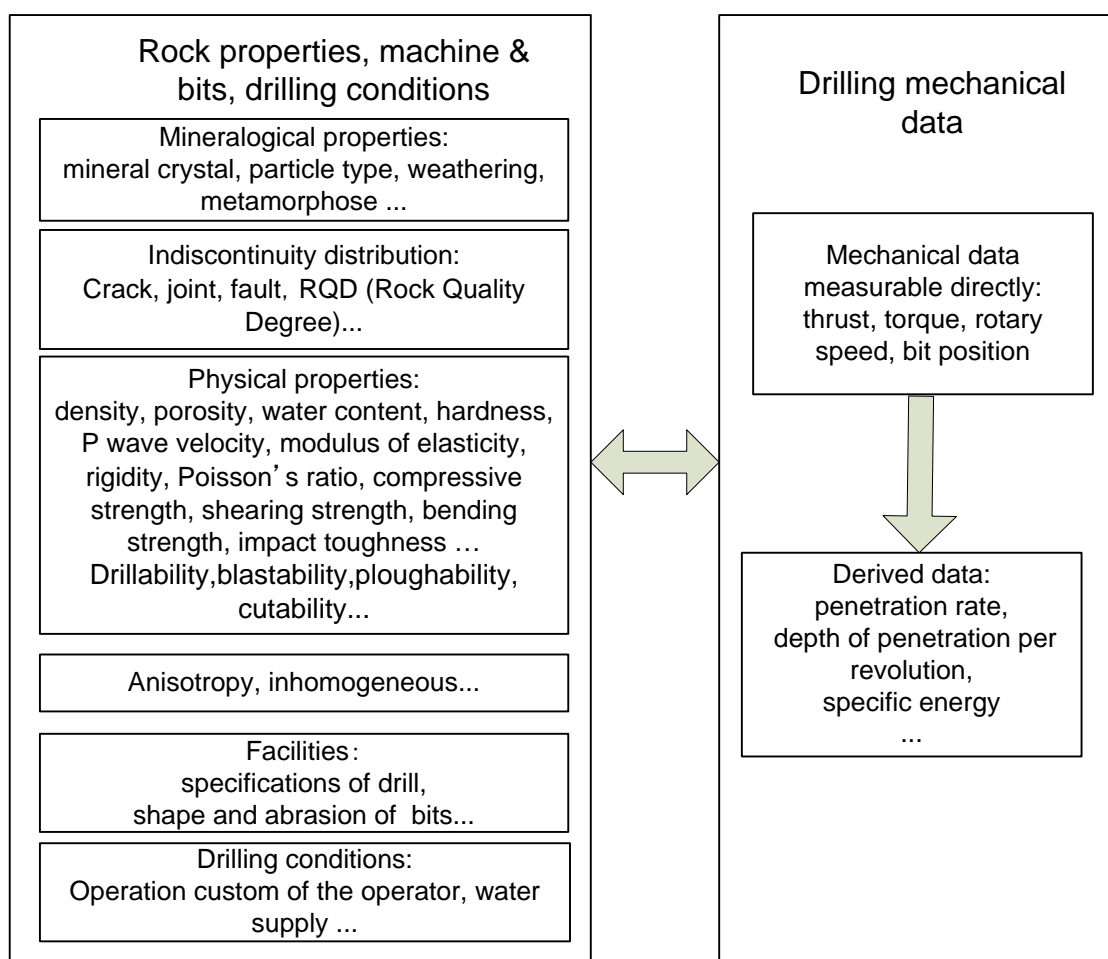


Figure 1.6: Complex and diversity relations between rock properties and drilling data.

① 削孔性 (Drillability) と機械量

岩盤の削孔しやすさを表す指標として、削孔性 (Drillability) がある。しかし削孔性の定義は研究者によって違っている。Hoseinie et al.^{1.28)}は、削孔性を岩盤の性質と考えし、削孔速度を削孔性の評価指標として用いた。Thuro^{1.29)}の研究では、削孔速度とビット磨耗量を用いて削孔性を評価している。Uspenskaya^{1.30)}は、削孔性に影響を与える要因として、地層性状、岩石物性とビット形状を取り上げ、削孔性を評価するパラメータとして体積比エネルギーを用いた。このように、削孔性を扱った文献は多数あるが、実際には削孔速度や体積比エネルギーなどの同義語として扱われている。以下には、削孔性に関する代表的な論文として、Hoseinie et al.の研究を紹介する。

Hoseinie et al.は、次のパラメータを用いて、削孔性を求めた。

- a) 岩盤の物理的性質：組織と結晶粒子のサイズ。
- b) 岩盤の強度指数：単軸圧縮強度と Mohs 硬度。
- c) 岩盤の構造指数：節理間隔、節理、裂隙間填充物の性質と裂隙幅、節理傾斜角。

Figure 1.7 は、各パラメータの関係を示している。また、Hoseinie et al.の現場試験結果より、削孔性は削孔速度と強い相関を持つことが示されている (Figure 1.8)。

Figure 1.9 は、岩盤の物理的性質、強度、節理の削孔性に対する影響を表している。しかし、各影響要因の割合は経験的で、応用は困難である。

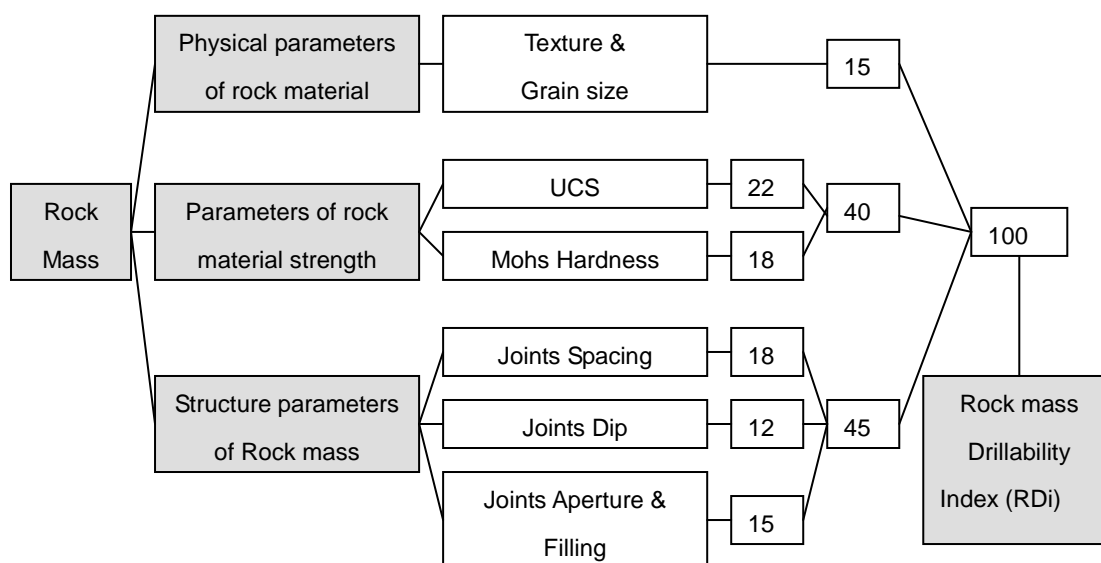


Figure 1.7: Rock mass classification in respect of structure and strength^{1.28)}

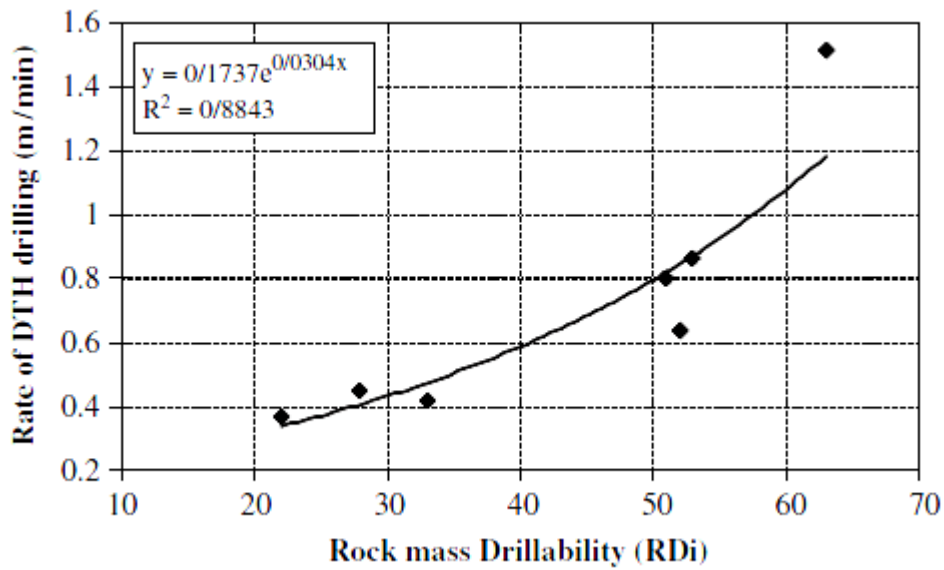


Figure 1.8: Relationship between RD_i and rate of DTH drilling in Sungun mine^{1.28)}

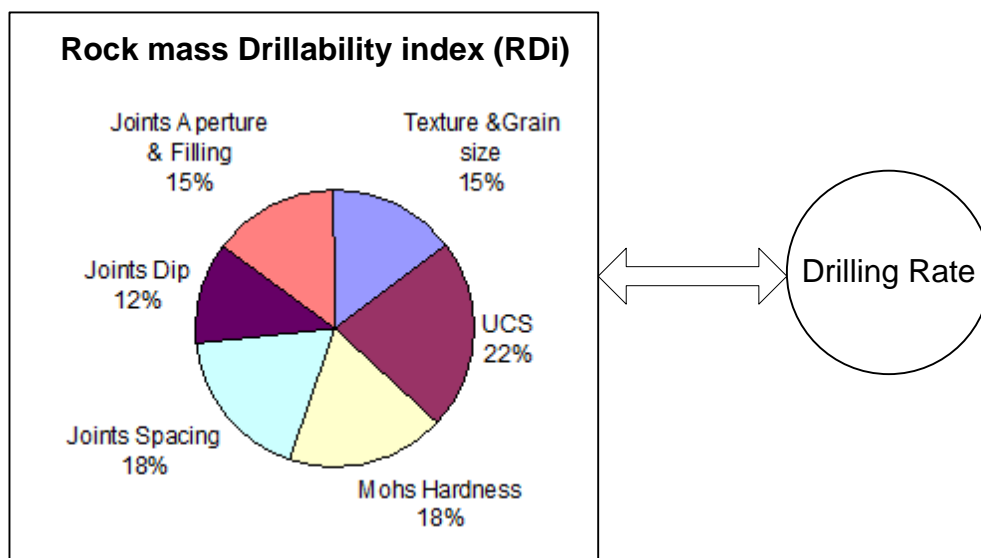


Figure 1.9: Relation between RD_i and drilling rate^{1.28)}

② 岩石の性質と削孔速度の関係

本節では、Thuro^{1.29)}と Kahraman et al.^{1.31) 1.32)}の2つの研究を紹介し、岩石の性質と削孔速度の関係を概観する。

Thuro は、見掛け破壊仕事量、亀裂間隔、空隙率と削孔速度の関係を検討した (Figure 1.10) . ここで見掛け破壊仕事量 (specific destruction work) という概念を提案した (Figure 1.11) .

$$W_z = \int \sigma d\varepsilon$$

σ : 応力

W_z : 体積比破壊仕事 (KJ/m³)

結局、体積比破壊仕事は一軸圧縮強度と Young 率による決定されるパラメータである。実験結果により、体積比破壊仕事と削孔速度の間に、次のような相関関係があることが見られた (Figure 1.12) .

$$DR = 5.49 - 0.60 \ln(W_z)$$

DR: 削孔速度 (m/min)

これにより、削孔速度から岩石の見掛け破壊仕事量を推定することが可能になった。

また、Figure 1.13 に示すように、平均亀裂間隔が大きければ、地層性状が良好で、削孔速度は低くなる。削孔速度から不連続面の分布状況を推定することが可能になる。同じように、Figure 1.14 では、空隙率と削孔速度の関係を示す。空隙率に比例して、削孔速度が高くなることが分かった。

この研究では、見掛け破壊仕事量、亀裂間隔、空隙率がそれぞれの削孔速度との間の関係は示されているものの、それぞれの影響の割合は示されていない。

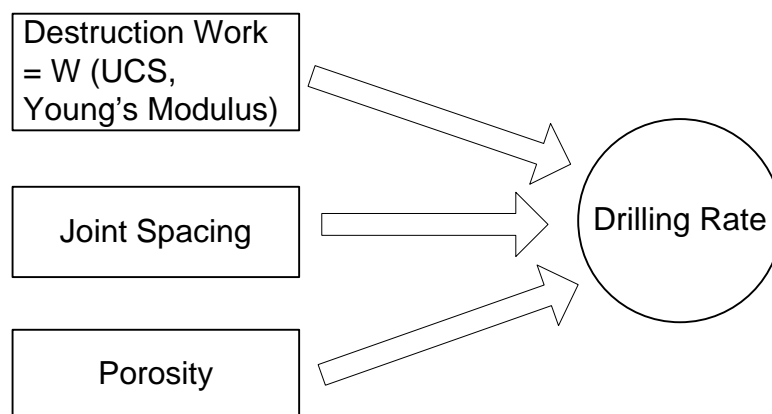


Figure 1.10: Relation between physical properties and drilling rate

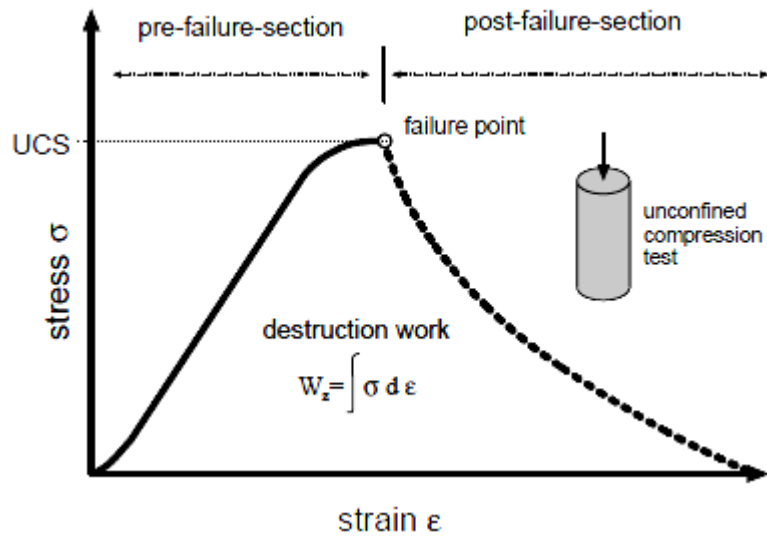


Figure 1.11: Concept of destruction work^{1.29)}

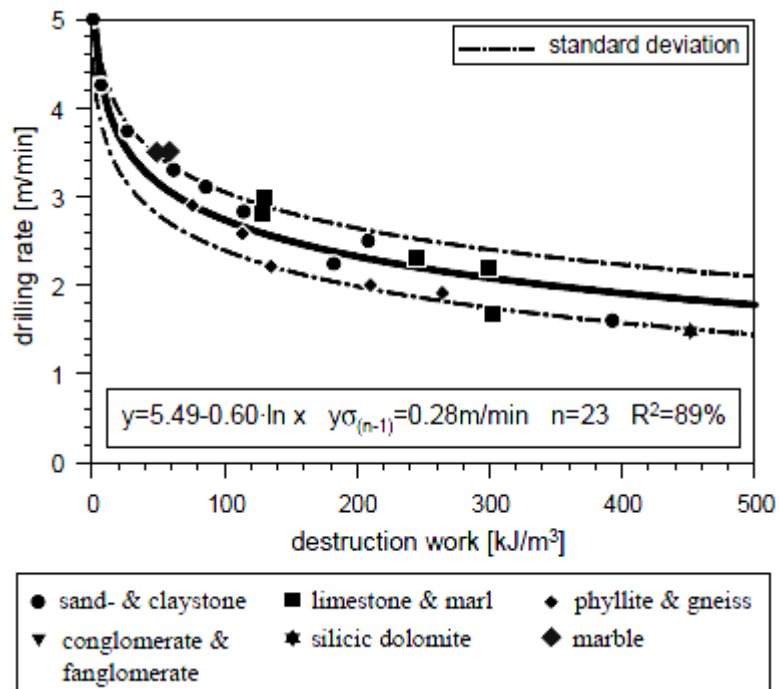


Figure 1.12: Relationship between destruction work and drilling rate^{1.29)}

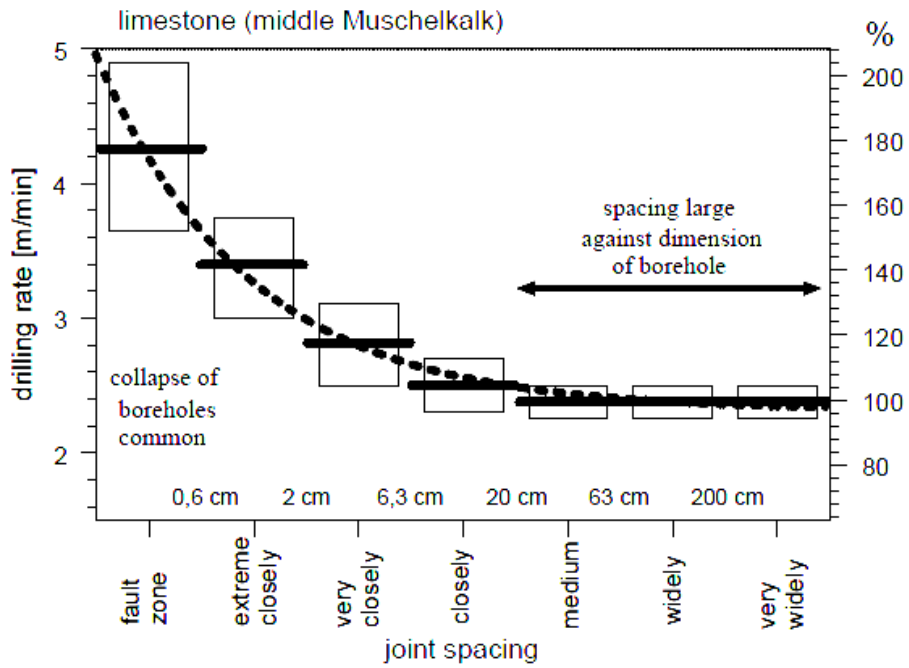


Figure 1.13: Relationship between joint spacing and drilling rate^{1,29)}

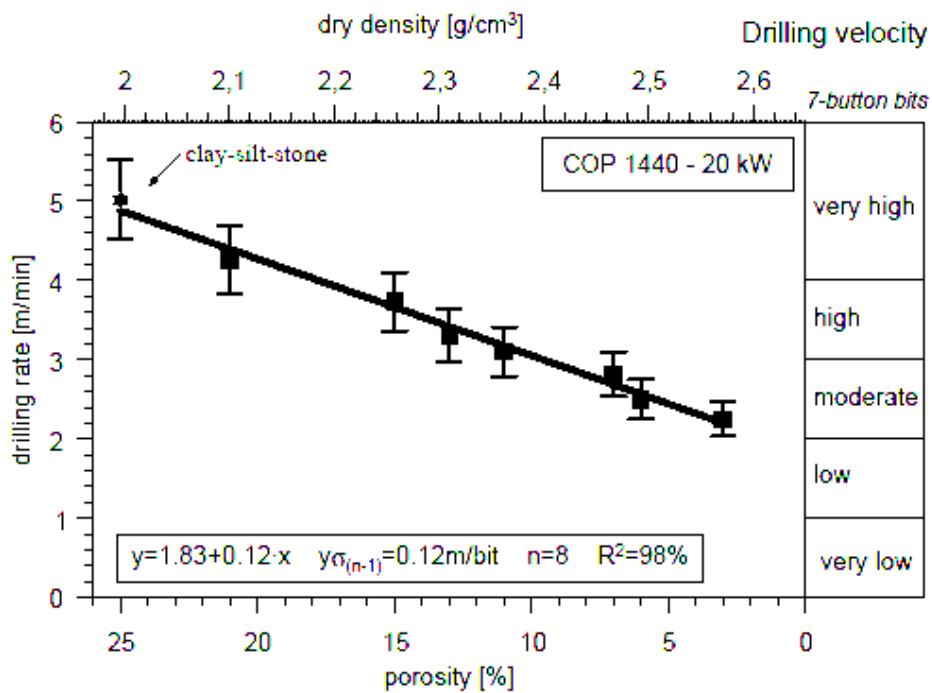


Figure 1.14: Relationship between porosity and drilling rate^{1,29)}

Kahraman et al.^{1.31)}は、top hammer drill rigs (トップハンマードリルリング) を利用し、8種類の岩石で削孔試験を行ない、削孔速度 (PR) と岩石の物性値との関係をまとめた。削孔速度が、一軸圧縮強度や、引張強度、弾性係数、点載荷指標 (point load index)、シュミットハンマーの反撥値 (Schmidt hammer value) と衝撃強度指標 (impact strength index) の間に、次の比例関係を報告している。

$$PR = -0.0079\sigma_c + 1.67, r=0.97$$

$$PR = -0.083\sigma_t + 1.67, r=0.91$$

$$PR = -7 \times 10^{-5} E + 1.61, r=0.60$$

$$PR = -0.096I_s + 1.60, r=0.87$$

$$PR = -0.037R_N + 1.60, r=0.90$$

$$PR = -0.046ISI + 4.85, r=0.72$$

ここで、 σ_c は一軸圧縮強度、 σ_t は引張強度、 E は弾性係数、 I_s は点載荷指標、 R_N はシュミットハンマーの反撥値、 ISI は衝撃強度指標である。

Kahraman et al.^{1.32)}は、いくつかの文献からデータを引用し、岩石の modulus ratio (Young 率と一軸圧縮強度の比) と削孔速度の相関関係を見出した。しかし、削孔データ毎に、相関関係式が異なり、統一した関係式が表せていない。

③ 岩石の性状と体積比エネルギーの関係

岩石の性状と体積比エネルギーの関係に関する論文としては、

- 削孔を対象とする (Teale^{1.33)}, Hoberock et al.^{1.34)}, LaBelle et al.^{1.35)}, Scoble et al.^{1.36)} と唐澤ら^{1.37)});
- roadheader の掘削を対象とする (Balci et al.^{1.38)});
- さく岩機を対象とする (Tiryaki et al.^{1.39)});
- 割裂を対象とする (Basarir et al.^{1.40)});
- 切削を対象とする (Altindag^{1.41)})

の代表的な論文を紹介する。

Teale^{1.33)}は体積比エネルギーの概念を提案した。Teale により、地層構造の変化は、見掛けの削孔エネルギーにより評価している。見掛けの削孔エネルギーは、機械量データにより次式で表せる。

$$Es = \frac{F}{A} + \frac{2\pi NT}{Au}$$

ここで、 Es は体積比エネルギー、 F は推力、 A は削孔断面積、 N は回転数、 T はトルク、 u は削孔速度である。本研究では、1項を推力エネルギー、2項を回転エネルギーと呼ぶ。体積比エネルギーは、推力、トルク、回転数と削孔速度の4つの重要な機械量から誘導され、各機械量の総合的な作用を表している。すなわち、削孔性を反映している。

また、Teale は多くの実験データから、体積比エネルギーの最小値と岩石の一軸圧縮強度が

等しいことを発見した。

$$Esm = UCS$$

ここで、 Esm は体積比エネルギーの最小値、 UCS は単軸圧縮強度である。

この経験式は非常に簡便で、岩石の一軸圧縮強度を推定するのに便利であるが、削孔条件と削孔機、ビットの影響を考慮する必要があると考えられる。

Hoberock et al.^{1.34)} は、Teale の手法に基づいて、ビットパラメータを求めることを避け、機械量から岩石強度を推定する簡便な方法を提案した。しかし、現場試験による検証結果の報告はない。

LaBelle et al.^{1.35)} は削孔パラメータから岩種を推定する方法論について検討した。また、体積比エネルギーを検層に利用した。強度変化を推定することは可能であるが、岩種の確認は困難であると報告している。2つの理由を挙げている。第一に、岩種が同じでも、削孔パラメータが激しく変動すると、体積比エネルギーも変動する。第二に、岩種が違って、強度が同じである可能性がある。

これらの点には、Gu^{1.24)} は同様な結果を示した。Gu は、削孔エネルギーの変動の原因は、岩石の物性値だけではなく、同じな岩石でも、推力の変化によって、エネルギーも変動することを指摘した。その理由は、推力の変動により、ビットと岩石の摩擦や、切削、ロッドの変形に要するエネルギーも変動すると主張している。また、削孔パラメータに影響する要因は、削孔機の種類やビットの幾何形状と磨耗程度、給水量、操作者の操作方法など様々である。これらの変動要因の間には、未明であるため、削孔の力学モデルを構築することは困難である。そこで、Gu は、ニューラルネットワークを用いて、室内試験による検層結果を定量的に検証した。

Scoble et al.^{1.36)} は、削孔において体積比エネルギーの変動傾向は岩石の強度の変化に関連していることを明らかにした。唐澤ら^{1.37)} は、ロータリ・パーカッション掘削における体積比エネルギーの最小値が岩石の一軸圧縮強度と大雑把に一致する結果を得た。この結果はTeale の結論と一致する。

体積比エネルギーに関する研究は、削孔に限らず、トンネルボーリングマシン (TBM) やロードヘッダ (Roadheader)、さく岩機 (Cutting picks) による岩石掘削においても、盛んになっている。例えば、Balci et al.^{1.38)} は、23種類の岩石に対して実験を行ない、統計解析法を用いてロードヘッダの掘削体積比エネルギーの最適値 (最小値) と岩石の諸物性値の相関関係を確認し、岩石物性値からロードヘッダの体積比エネルギーを推定する方法を提案した。Figure 1.15 は体積比エネルギーと相関関係が見られた物性値を表している。一軸圧縮強度あるいは引張強度との相関性が高いので (Figure 1.16)、それだけ使っても一軸圧縮強度あるいは引張強度を推定することができると考えられる。

Tiryaki et al.^{1.39)} は、さく岩機を用いた多くの室内試験を行ない、体積比エネルギーと岩石強度の関係について詳しく調査した。両者は次式の線形関係を見出した。

Specific cutting energy (MJ/m³) = 3.60+0.17UCS(MPa) (相関係数 0.723)

また, Basarir et al.^{1.40)}は, 体積比エネルギーから岩石の割裂性を推定する方法を提案した, 統計的に体積比エネルギーと幅広い岩石物性値の関係をまとめている (Figure 1.17). ほとんどの物性値が体積比エネルギーと線形関係になることを確認した.

岩石切削の例について, Altindag^{1.41)}は, 「岩石の脆性度」を次のように定義した.

$$B_3 = \frac{\sigma_c \times \sigma_T}{2}$$

ここでは, B_3 : 脆性, σ_c : 一軸圧縮強度, σ_T : 引張強度である.

体積比エネルギーと脆性度との相関関係があることを見出した. しかし, データはいくつかの文献を利用した. 削孔データ毎に, 相関関係式も違うので, 統一した関係式を見出していない.

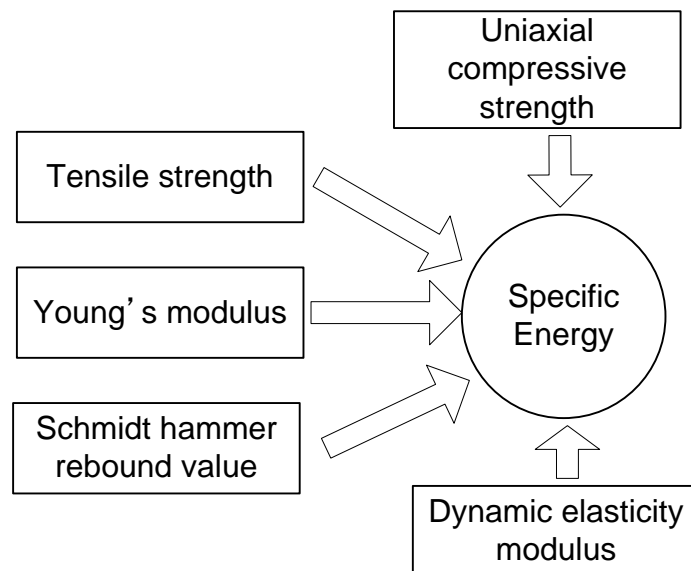


Figure 1.15: Relation between physical properties and specific energy (Balci)^{1.38)}.

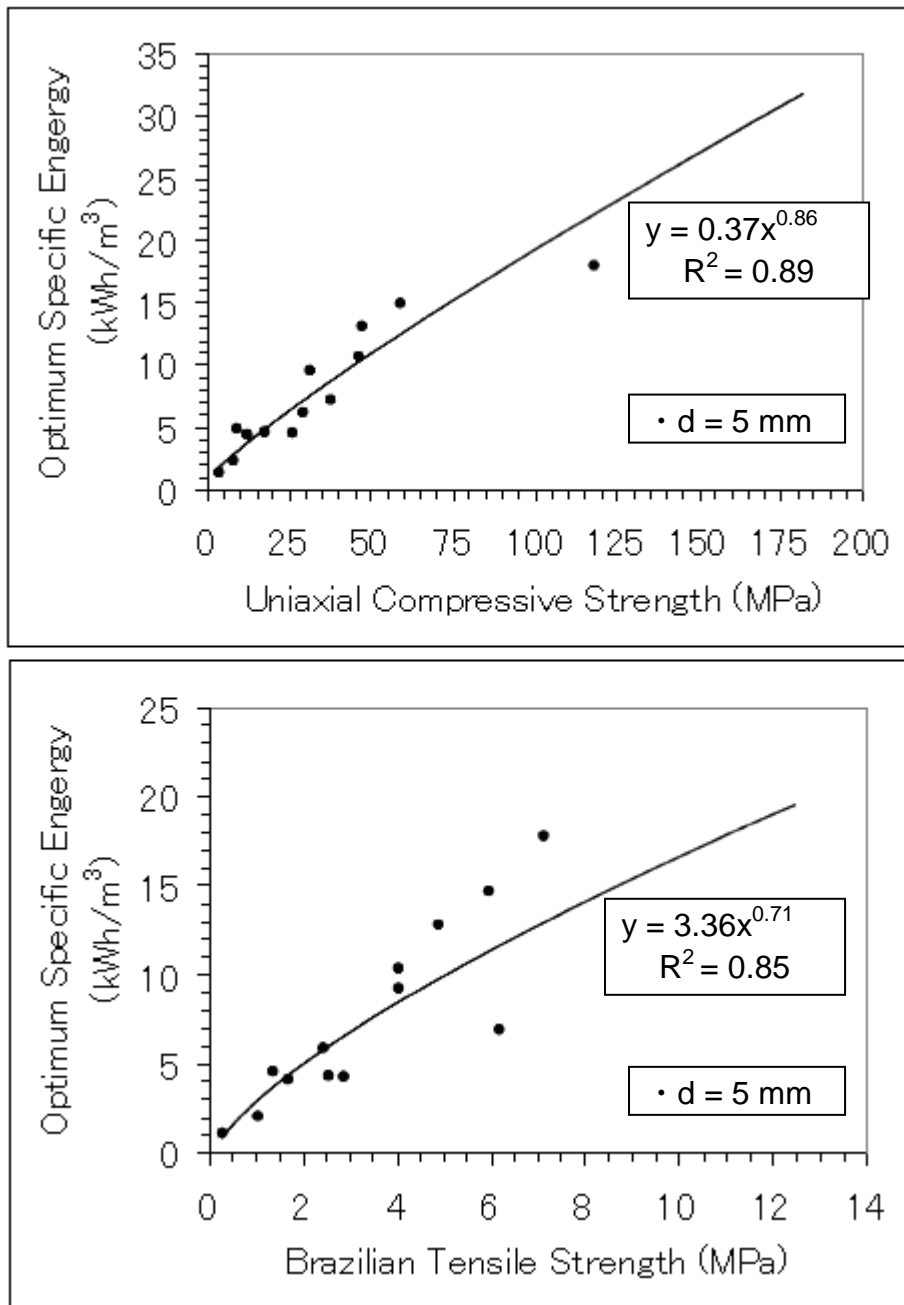


Figure 1.16: Relation between UCS, Tensile strength and specific energy (Balci)^{1.38}.

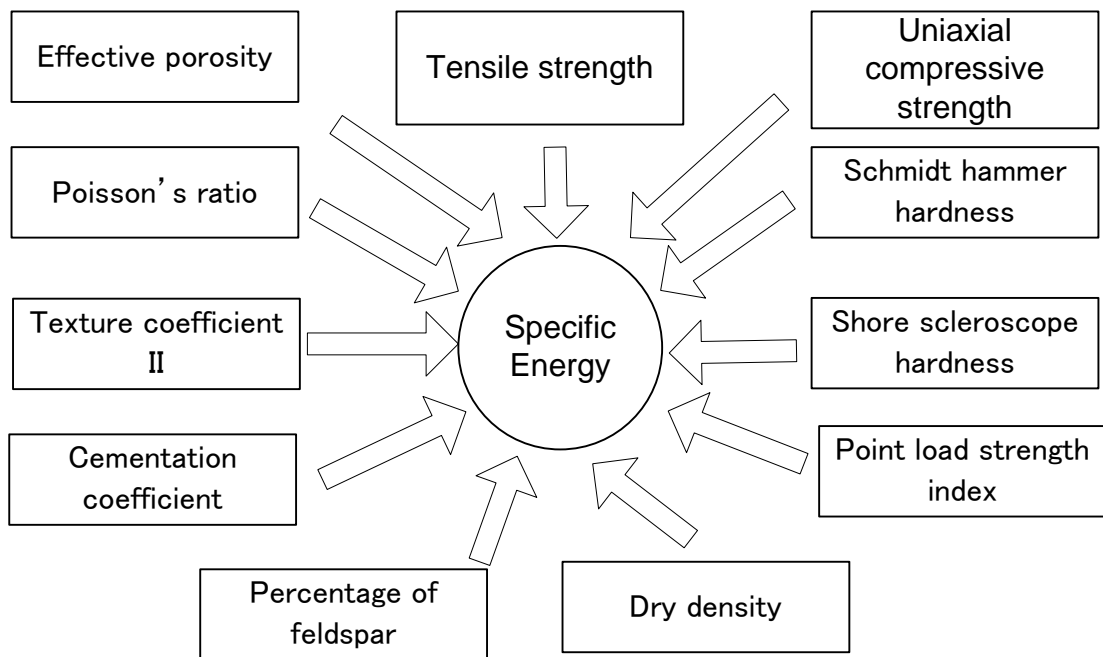


Figure 1.17: Relation between physical properties and specific energy (Basarir)^{1,40}.

以上のように、削孔機械量と岩石性状の関係に関する研究は多く、上述のような成果が得られている。しかし、理論的な研究は少なく、有効な削孔力学モデルも十分に検討されているとは言えない状況にある。特に、一軸圧縮強度は施工上重要であるが、機械量データと一軸圧縮強度の関係についての理論的な検討は不十分である。すなわち、削孔機の種類やビット形状、削孔条件に関わらず、機械量データから検層可能な手法は確立していない。また、削孔機械量から不連続面を検出する手法も十分確立していないのが現状である。

1.3 研究目的

本研究では、小口径（口径 27.5 mm-136 mm 程度）ボーリングを対象とした天盤検層削孔システムの開発のために、主に次に述べる 3つの研究目的を設定した。

第一は、削孔機械量と地層性質の関係の解明である。

岩石の削孔プロセスを切削（Cutting）と送り（feed）の 2つの運動に分け、岩石切削理論と切込理論に基づき、削孔分析モデルを構築する。実験により、機械量と岩石一軸圧縮強度の関係式を求め、削孔分析モデルの妥当性を検証する。

また、既往の研究と実験に基づき、いくつかの機械量パラメータを用いて、不連続面位置の検出手法を確立する。

第二は、ハードウェアシステムの構築である。

既往の開発経験を踏まえ、削孔機や計測項目、センサなどを選択し、高精度、自動的に機械量データを探知、計測、記録できるシステムを構築する。

第三は、ソフトウェアの開発である。

第一の目的で述べた削孔機械量と地層性質の関係に基づいて、自動的かつ客観的に検層データを解析するソフトウェアシステムを開発する。すなわち、機械量から岩石の一軸圧縮強度、不連続面位置を推定する。また、バーチャルリアリティ技術を用いて、推定した地層構造を直感的に表示するシステムを開発する。このシステムを用いた実証試験を行ない、システムの有効性及び適応限界を明らかにする。

本研究で目指す削孔システムが実現すれば、推定された天盤構造をもとに、ロックボルトの分布密度や種類、本数などを決定できることにより、ロックボルト支保の効果が高まり、落盤事故の軽減に繋がると期待される。

1.4 論文の構成

本論文は、Figure 1.18 に示すように全 6 章から構成されている。

第 2 章では、岩石切削理論に基づいて、回転式削孔分析モデルを構築し、削孔トルク、推力、体積比エネルギーなどの機械量と岩石性状との関係式を誘導する。

第 3 章では、室内 MWD 装置の開発について述べる。また、室内試験により、本研究で開発した削孔分析モデルと理論式を検証し、削孔機械量から岩石性状を推定できることを検証する。

第 4 章では、検層用削孔システムのハードウェアシステムとソフトウェアシステムを説明する。

第 5 章では、開発した削孔システムを用いて、豪州の Gujarat NRE No.1 炭鉱と釧路コーラルマインにおける削孔試験を行ない、削孔データを得た。本研究で開発したソフトウェアを用いて地層状況の推定を行ない、コアボーリングで採取された試料の物性値と比較し、本研究で提案した手法の有用性を検証している。また、バーチャルリアリティ技術を利用して、検層結果を 3 次元に表示するシステムについて述べる。

第 6 章では、本研究の主な成果をまとめ、本システムの有用性について述べる。

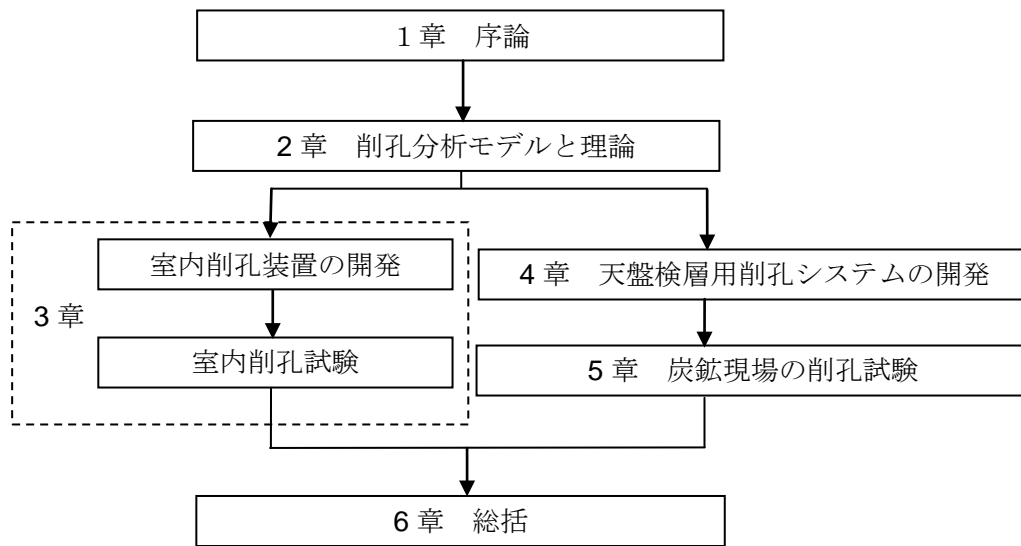


Figure 1.18: Outline of this paper.

参考文献

- 1.1) BP Statistical Review of World Energy, June 2010, <http://www.bp.com/>
- 1.2) World Coal Institute, <http://www.worldcoal.org/coal/coal-mining/>
- 1.3) Jiao, D. and Jiao, G., Causes and Measures of Roof Accidents in Conventional Mechanical Face, Shaanxi Meitan, 2009.3. (In Chinese)
- 1.4) Ning, Y., The Characteristics of Coal Mining Disasters in China and Its Measures, Labour Protection, 2009.3. (In Chinese)
- 1.5) State Administration of Coal Mine Safety (China): <http://db.cworksafety.com/law/coal/102669/46345.html> (In Chinese)
- 1.6) Shandong Coal Mines Safety Supervision Bureau: <http://www.sxcoal.com/mkaq/744522/articlenew.html> (In Chinese)
- 1.7) Mine Safety and Health Administration (America): <http://www.msha.gov/stats/charts/coaldaily.asp>
- 1.8) Minerals Council of Australia: http://www.minerals.org.au/safety/safety_and_health_performance
- 1.9) Mark, C., Pappas, D.M., Barczak, T.M., Current Trends in Reducing Ground Fall Accidents in US Coal Mines, 2009 SME Annual Meeting and Exhibit, Denver, Colorado, preprint 09-069. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, pp. 1-5, February 22-25, 2009.
- 1.10) Peng, S.S., and Tang, D.H.Y., Roof Bolting in Underground Mining: A State-of-the-Art Review, International Journal of Mining Engineering, Vol. 2, pp. 1-42, 1984.

- 1.11) Hagan, P.C., A Study of the Variability of Some Rock Bolt Parameters and Their Potential Impact on Anchorage Performance in Coal Mines, Proceedings of Conference on Effective Risk Management for Mining Project Optimisation, Sydney, September 9-12, 2003. (Australasian Institute of Mining and Metallurgy)
- 1.12) Li, G., Zhang, N., Liu, Z., Kan, J., Prestress Truss Bolt Support Technology for Coal Roadway, Journal of Mining & Safety Engineering, Vol. 24(2) , 2007. (In Chinese)
- 1.13) Arthur, J., Ground Control in Coal Mines in Great Britain, 2006 Coal Operators' Conference, pp.10-19.
- 1.14) Itakura, K., Sato, K., Deguchi, G, Ichihara Y. and Matsumoto, H., Visualization System for Rock Using the Mechanical Data of Roofbolter, Journal of MMIJ, Vol. 115, pp. 83-89, 1999.
- 1.15) Desbrandes, R. and Clayton, R., Chapter 9 Measurement While Drilling, Developments in Petroleum Science, Vol. 38, pp. 251-279, 1994.
- 1.16) Razak, A. and Razif, M., Downhole Measurement MWD, Buletin FKKS SA, 1991, 5 (2). pp. 47-52. ISSN 0128-0740.
- 1.17) Noureldin A., Doctorial Thesis: New Measurement-While-Drilling Surveying Technique Utilizing Sets of Fiber Optic Rotation Sensors, University of Calgary, March 2002.
- 1.18) Prensky, S., Recent Advances in LWD/MWD and Formation Evaluation: Developments include Wireline and While-Drilling Logging, Autotuning NMR Technology, Radial Acoustic Measurements and 3D Digital Core-Evaluation Methods, World Oil, pp. 69-75, March 2006.
- 1.19) Howie, W.L., Frizzell, E.M., A Smart Bolter for Improving Entry Stability, Industry Applications Society Annual Meeting, 1989, Conference Record of the 1989 IEEE, vol.2, pp. 1556–1564, October 1989.
- 1.20) Gui, M.W. and Hamelin, J.P., Development of An Instrumented Borehole Drilling System for Ground Investigation, Electronic J of Geotechnical Engineering, Vol. 9(A), pp. 350, 2004.
- 1.21) Gui, M.W., Soga, M.K., Bolton, M.D. and Hamelin, J. P., Instrumented Borehole Drilling for Subsurface Investigation, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128(4), pp. 283-291, April 2002.
- 1.22) Finfinger, G., Peng, S.S., Gu, Q., Wilson, G. and Thomas, B., An Approach to Identify Geological Properties from Roof Bolter Drilling Parameters, 19th Conference on Ground Control in Mining, pp. 1-11, August 2000.
- 1.23) Anderson, R., Prosser, L.J., Improving the Capability for Real Time Assessment of Roof Conditions Through Intelligent Roof Bolt Drilling Operations, Proceedings of the 26th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, West Virginia, July 31 - August 2, 2007.
- 1.24) Gu, Q., Doctorial Thesis, Geological Mapping of Entry Roof in Mines, College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University, 2003.

- 1.25) Utt, W.K. ; Miller, G.G. ; Howie, W.L., Woodward, C.C., Drill Monitor With Strata Strength Classification in Near-Real Time, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2002-141, Report of Investigations 9658, pp. 1-14, July 2002.
- 1.26) Yue, Z.Q., Lee, C.F., Law, K.T. and Tham, L.G., Automatic Monitoring of Rotary-Percussive Drilling For Ground Characterization—Illustrated by a Case Example in Hong Kong, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Vol. 41(4), pp. 573-612, June 2004.
- 1.27) 岩石力学入門（第2版），山口梅太郎，西松裕一，東京大学出版会，1967年，pp. 12-19.
- 1.28) Hoseinie, S.H., Aghababaei, H. and Pourrahimian, Y., Development of A New Classification System for Assessing of Rock Mass Drillability Index (Rdi), International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 45(1), pp. 1-10, January 2008.
- 1.29) Thuro, K., Drillability Prediction - Geological Influences in Hard Rock Drill and Blast Tunnelling, Geologische Rundschau, Vol. 86, pp. 426-437, 1997.
- 1.30) Uspenskaya, A.B., Comparison of the Thermal Drillability of Quartz-Containing Rocks with the Value of the Piezoelectric Effect, Journal of Mining Science, Vol. 1(3), pp. 240-242, May 1965.
- 1.31) Kahraman, S., Bilgin, N., and Ferindunoglu, C., Dominant Rock Properties Affecting the Penetration Rate of Percussive Drills, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 40 (5), pp. 711–723, 2003.
- 1.32) Kahraman, S., Performance Analysis of Drilling Machines Using Rock Modulus Ratio, Journal of the South African Institute of Mining & Metallurgy, vol. 103(8), pp. 515-522, 2003.
- 1.33) Teale, R., The Concept of Specific Energy in Rock Drilling, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 2, pp. 57–73, 1965.
- 1.34) Hoberock, L.L. and Bratcher, G. J., A New Approach for Determining In-Situ Rock Strength While Drilling, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 118(4), pp. 249-255, 1996.
- 1.35) LaBelle, D., Bares, J. and Nourbakhsh, I., Material Classification by Drilling, Proceedings of the 17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, September 2000.
- 1.36) Scoble, M.J., Peck, J. and Hendricks, C., Correlation between Rotary Drill Performance Parameters and Borehole Geophysical Logging, Mining Science and Technology, Vol. 8, pp. 301-312, 1989.
- 1.37) 唐澤廣和，鈴木 宏治，高橋幸司，ロータリ・パーカッション掘削における岩石掘

- 削特性に関する研究, Journal of MMIJ, Vol. 125, pp.13-20, 2009.
- 1.38) Balci, C., Demircin, M.A., Copur, H. and Tuncdemir, H., Estimation of Optimum Specific Energy Based on Rock Properties for Assessment of Roadheader Performance, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 104 (11), pp. 633-643, 2004.
 - 1.39) Tiryaki, B. and Dikmen, A.C., Effects of Rock Properties on Specific Cutting Energy in Linear Cutting of Sandstones by Picks, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 39(2), pp. 89-120, 2006.
 - 1.40) Basarir, H., Karpuz, C., Tutluoglu, L., Specific Energy Based Rippability Classification System for Coal Measure Rock, Journal of Terramechanics, Vol. 45(1-2), pp. 45-52, 2008.
 - 1.41) Altindag, R., Correlation of Specific Energy with Rock Brittleness Concepts on Rock Cutting, The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 103(3), pp. 163–171, 2003.

第2章 回転削孔メカニズム

2.1 はじめに

回転式削孔機を対象にその機械量から岩石の物性値を推定すること（検層）と、逆に岩石物性値から削孔性（Drillability）を予測する問題は本質的に同じである。すなわち、削孔機械量と岩石物性値の相互関係の解明である。

これまでの削孔機械量と岩石物性値の相互関係に関する研究では、研究方法に関しては、実験による解明が主流である。その手順は、①岩石物性値を測定する、②削孔実験を実施、機械量を記録、処理、計算する、③機械量と物性値の関係をまとめる。③番目の機械量と物性値の関係としては、回帰分析による実験式の提案が一般的であるが、近年、ニューラルネットワークや主成分分析のような手法も応用されている。これらの方法は、機械量と物性値の関係を実験式で表す手法であり、実用的ではあるが、削孔メカニズムそのものを明らかにしているわけではない。

この問題を解決するためには、岩石削孔理論に基づかざるをえない。岩石削孔はビットと岩石の相對運動により回転式と打撃式の2種類に分けられる。ビットの種類には切削型ビット（drag bit）、ダイヤモンドビット（diamond bit）、ローラービット（roller cone bit）、PDCビット（Polycrystalline Diamond Compact Bit）などがある。削孔機とビットの種類によって、削孔メカニズムが異なる。本研究では、回転式削孔機を対象にし、切削型ビットの削孔理論を検討した。本章では、その結果について述べる。

この数十年の間に、岩石削孔理論の焦点は、分析モデル（analytical model. モデルに基づいて、切削理論式を導く）から有限要素法や個別要素法などの数値解析モデルに変わってきた。通常、数値解析方法は、より正確に切削プロセスを分析し、シミュレーションすることができる。しかし、数値解析方法では、物性値と機械量の間を定式化したり、一般化することは難しい。一方、数値解析方法に比べて、分析モデルは多くの仮定と近似を含み、解析の精度に問題があるが、分析モデルは切削力や、岩盤の構造、岩石の物性値、ビットの形状と機械量との間を記述することができる。したがって、切削プロセスの研究においては、分析モデルを用いた研究も不可欠である。

岩石切削理論の研究は金属切削理論を基にしている。金属切削理論としては、Merchant理論がある。Merchant理論では、塑性変形が限界に達する時、破壊が発生する^{2.1)} (Figure 2.1)。この過程では、破壊面のせん断力が塑性変形とともに増大する。せん断力が材料のせん断強度を超えると、切屑が材料から分離する。

また、Figure 2.2 に示すように、Merchantの理論式は以下の式で表わされる^{2.1)2.2)}。

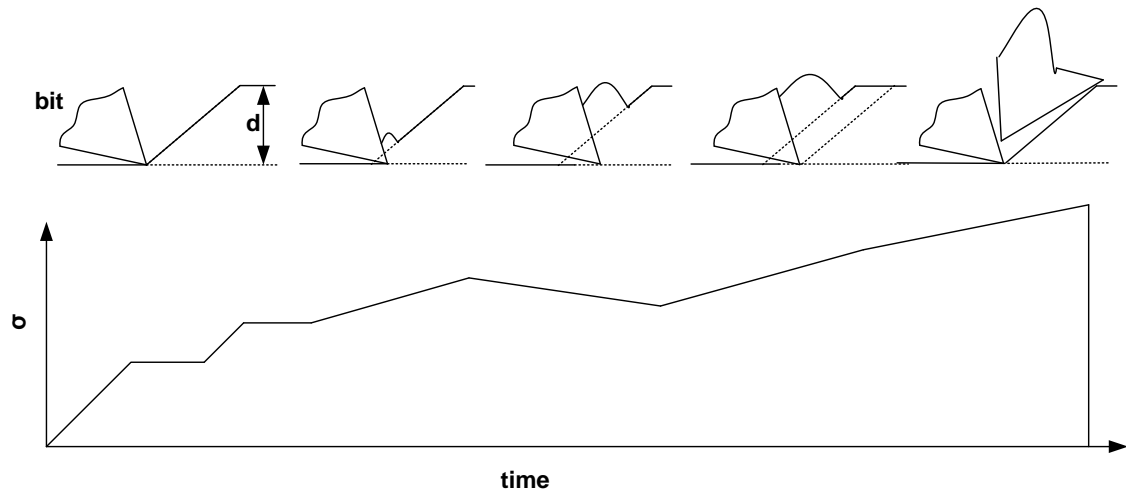


Figure 2.1: The failure process of metal cutting^{2.1)}

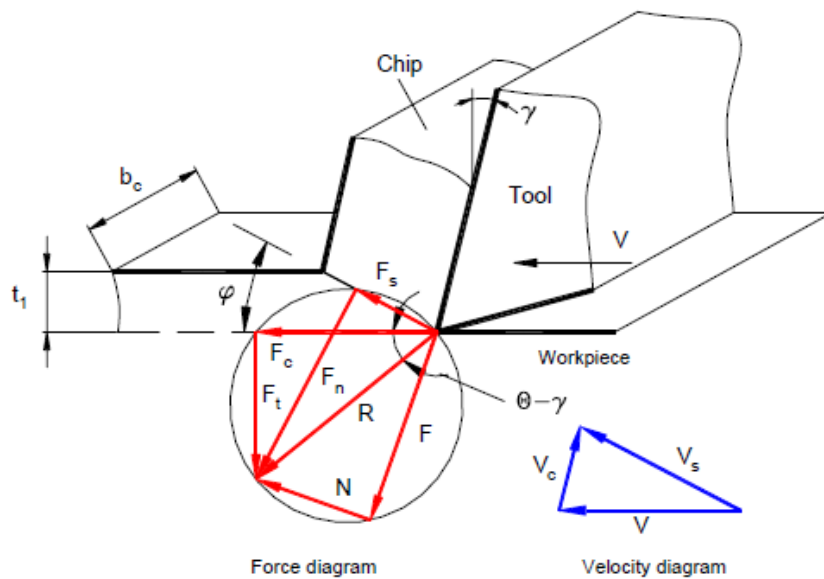


Figure 2.2: Single shear plane model of Merchant^{2.2)}

$$F_s = \frac{S_s A_c}{\sin \phi} \quad (2.1)$$

ここで、 F_s はせん断力、 A_c は切削断面積、 S_s はせん断強度である。

岩石の破壊理論としては、1960年代に Evans は貫入理論を提案した。Evans の理論によって、楔形工具が岩石に貫入する時、引張力が引張強度を超える時破壊が発生する (Figure 2.3)。Evans の理論式によると、切削力は下記の式によって計算できる^{2.3)}。

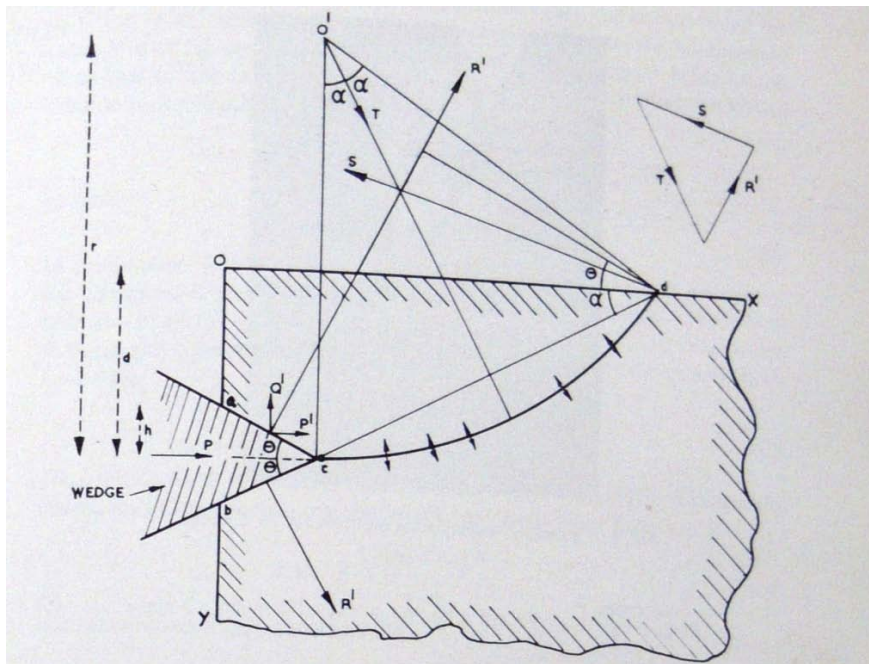


Figure 2.3: The failure model of Evans^{2.3)}

$$P = 2td \frac{\sin(\theta + \phi)}{1 - \sin(\theta + \phi)} \quad (2.2)$$

P : 水平推力

t : 引張強度

d : 切削深さ

θ : 楔形の半角

ϕ : 工具と岩石間の摩擦角

西松^{2.4)}は実験観察に基づいて、岩石の破壊が脆性破壊で、圧縮力と引張力両方があり、せん断力がせん断強度を超えると破壊されるという理論を提案した。Evansの「貫入」に対して、西松の岩石切削理論は典型的な金属切削のように、正の逃げ角で連続的に切削過程を扱い、幅広く認められるようになった。2.2節では、西松理論を紹介する。

最後に、回帰分析法の例をとって、Gunes et al.^{2.5)}の研究を述べる。Gune et al.は、様々な切削破壊メカニズムのモデルを考察し、刃先と岩石の相互作用が複雑過ぎるため、正確に直接分析や切削力を計算することができないことを主張し、回帰分析により切削力 FC を計算した。結果の経験式は以下である。

$$FC = -24.504 + 0.513S_s + 1.873d + 0.249f + 0.227W - 0.154\alpha - 0.047q \quad (2.3)$$

ここで、 t は引張強度、 S_s はせん断強度、 d は切込深さ、 f はビットと岩石間の滑り摩擦係数、 W はビットの幅、 α はすくい角、 q は一軸圧縮強度である。

2.2 西松理論の概略

2.2.1 切削過程

西松理論では、切削過程を下記のように扱っている (Figure 2.4).

Step 1: ビットによる切削が開始.

Step 2: ビット先端部と岩石の磨耗, 圧潰. 一部の岩石の層が強烈的な摩擦と圧力によってビットの刃先に粘着されて, 「構成刃先」になる. この領域は「第一の破碎領域」とも呼ばれる. 金属切削にも観察できる現象である. 脆性材料の岩石も実質的に塑性変形が発生する.

Step 3: ビットの圧力と磨耗により, 回りの岩石に割れ目が発生する. 割れ目が一番弱い方向へ発展し, 切屑の形を形成する.

Step 4: 続いてビットが移動し, 割れ目の下部に「二次的な破碎領域」が出現する. 切屑が外れる.

Step 5: 次のサイクルに移る.

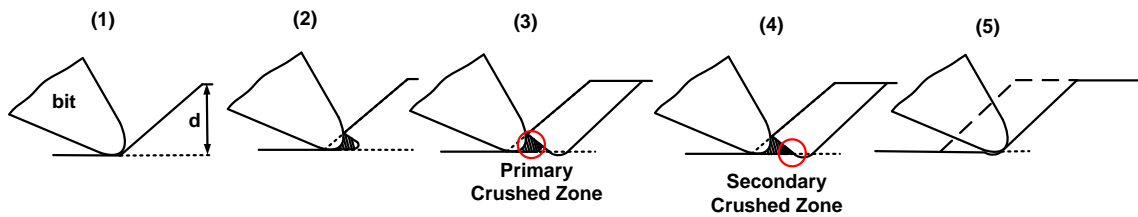


Figure 2.4: The failure process of Nishimatsu^{2,4)}

2.2.2 力学モデル

西松の岩石切削力学モデルを Figure 2.5 に示す. Table 2.1 には, 各記号の意味を述べる. この断面図は, 単位奥行き長さあたりの力学関係を表している.

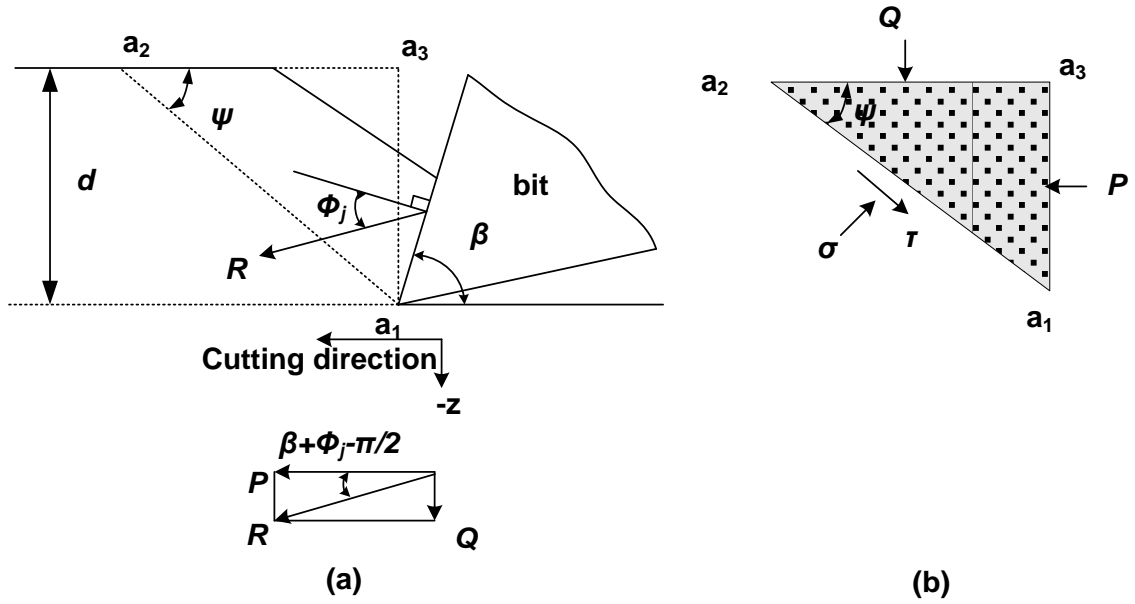


Figure 2.5: Geometric and mechanical model for rock cutting^{2,4)}

Table 2.1 Meanings of signs in Figure 2.5

Sign	Meaning	Sign	Meaning
Φ_j	Friction angle between the bit and rock	R	Cutting force per unit thickness
B	Blade angle of the bit	P	Main cutting force of R (equivalent to machine torque if consider the distance from the axis)
d	Penetration per revolution (PPR)	Q	Back cutting force of R (equivalent to thrust)
Ψ	Angle between free plane and failure plane	σ, τ	Stress components of failure plane

推力 Q と円周力 P の関係式は、下記のように表せる。

$$\frac{Q}{P} = \cot(\beta + \phi_j) \quad (2.4)$$

三角形 $a_1a_2a_3$ の応力成分の最大値は次式で表示する。

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= (n+1) \frac{\sin \psi}{d} \cdot R \cdot \cos(\psi + \beta + \phi_j) \\ \tau_{\max} &= -(n+1) \frac{\sin \psi}{d} \cdot R \cdot \sin(\psi + \beta + \phi_j) \end{aligned} \quad (2.5)$$

ただし、 n は応力分布係数である。

破断条件については Coulomb-Mohr の式を採用すると、

$$\tau = \frac{1}{2} C_0 \frac{1 - \sin \phi_i}{\cos \phi_i} + \sigma \tan \phi_i \quad (2.6)$$

τ : 破断面のせん断成分

σ : 破断面の垂直成分

C_0 : 岩石の一軸圧縮強度

Φ_i : 岩石の内部摩擦角

式(2.5)を式(2.6)に代入すると、切削力 R は

$$R = \frac{1}{2(n+1)} \cdot \frac{1 - \sin \phi_i}{\sin \psi} \cdot \frac{d}{\sin(\psi + \beta + \phi_i + \phi_j)} \cdot C_0 \quad (2.7)$$

になる。しかし、ここでは、 R は ψ によって変化する。 R の最小値は極値条件

$$\frac{\delta R}{\delta \psi} = 0, \psi = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta + \phi_i + \phi_j}{2} \quad (2.8)$$

を満たすときである。その時の R の最小値は次式で表される。

$$R = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{1 - \sin \phi_i}{1 + \cos(\beta + \phi_i + \phi_j)} \cdot d \cdot C_0 \quad (2.9)$$

推力と円周力は、以下のように表せる。

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{n+1} \cdot \frac{(1 - \sin \phi_i) \sin(\beta + \phi_j)}{1 + \cos(\beta + \phi_i + \phi_j)} \cdot d \cdot C_0 \\ Q &= \frac{1}{n+1} \cdot \frac{(1 - \sin \phi_i) \cos(\beta + \phi_j)}{1 + \cos(\beta + \phi_i + \phi_j)} \cdot d \cdot C_0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

式(2.10)において、ビットの形状、削孔深さ (mm/r) と岩石の物性値 (内部摩擦角、ビットと岩石の摩擦角、破断面に応力分布係数) が一定であると仮定する時、推力と円周力が一軸圧縮強度に比例していることが分かる。

このように、西松の理論は、岩石切削メカニズムに基づいて、切削機械量と岩石の物性値との関係を理論的に明らかにしている。しかし、西松のモデルでは、ビットの先端面の摩擦を考えていない。また、西松のモデルは岩石の切削を対象としているため、削孔過程におけるビットの送りを扱っていない。次の節では、切削とビットの送りの2つの運動を含めた削孔分析モデルの構築について述べる。

2.3 削孔分析モデルの提案

本研究では、削孔機械量と岩石の物性値との関係を理論的に解明するために、以下の分析モデルを提案する。

2.3.1 削孔過程の観察

Figure 2.6 に示すような高速度カメラ搭載顕微鏡 (KEYENCE VW-6000 レンズ VW-Z2)

を使って、削孔過程を観察した。削孔機は卓上ボール盤（日立 B13RH）で、ビットは切削型 Wing ビット（D4MB-1628-26, 外径 28 mm, Sandvik Mining and Construction 製）である（Figure 2.7）。削孔対象はレンガである（Figure 2.8）。観察システムを Figure 2.9 で示す。センサについては第 3 章で説明する。



Figure 2.6: The high speed video camera with a microscope (KEYENCE VW-6000 Lens VW-Z2)

(From: http://www.keyence.co.jp/microscope/high_speed/vw_6000/index.jsp?c=s_name)



Figure 2.7: The Two-Wing bit (D4MB-1628-26, by Sandvik Mining and Construction)

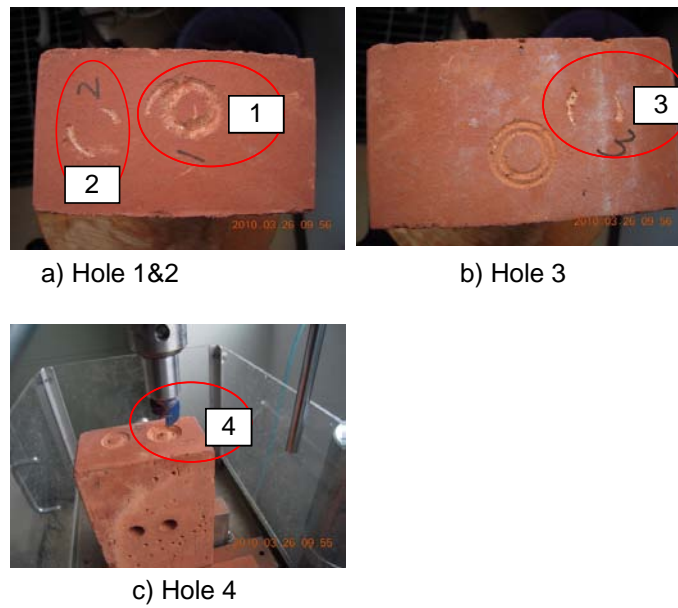


Figure 2.8: The bricks used in the experiment

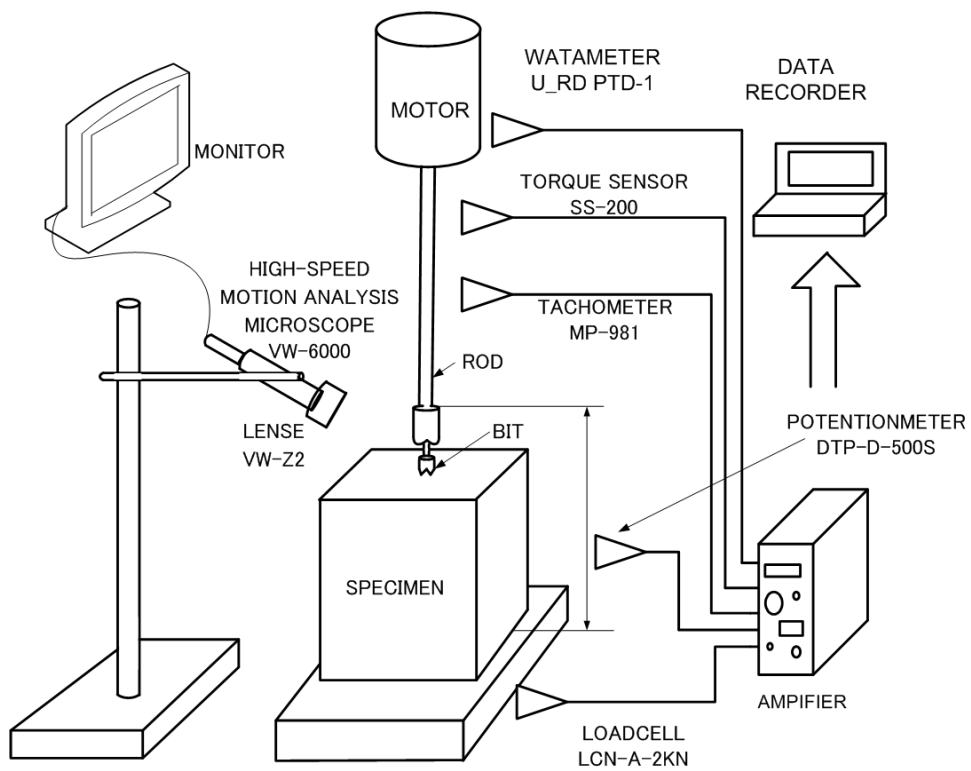


Figure 2.9: The drilling process watching system

卓上ボール盤と Wing 型ビットを用い、レンガの削孔過程を高速度カメラ付き顕微鏡で観測した。ビットを手動で回し、観察3回を行なった、撮影速度を 1000 fps、シャッタースピードを 1/4000 秒に設定した。この結果、以下のような削孔過程が明らかになった。

a) ビットが岩石に圧入される。

b) ロッドの回転に対して、応力がまだ材料の強度に達しないので、ビットの先端部が岩石の抗力で止められ、ビットの内部に弾性変形が発生し、ねじれが生じると考えられる。そのため、刃先が瞬間的に停止する。同時に、微小破壊が発生、微小な切屑が飛び出す (Figure 2.10 a))。

c) 切削力が岩石の強度に達すると、ビットとロッドの内部弾性エネルギーが瞬時に解放される。刃先の岩石が局所的に破壊し、塊状切屑が飛び出す (Figure 2.10b))。局所破壊のため、削孔深さが増す (ピットが形成される)。ビットがピットに落ち、岩石に圧入され、次のサイクルに移る。

以上の観察結果を Figure 2.11 にまとめる。同図の(a)は、圧入過程であり、(b)は、ビットとロッドの弾性変形を表している。(c)は、局所破壊により、塊状切屑が飛び出し、ピットが形成される。

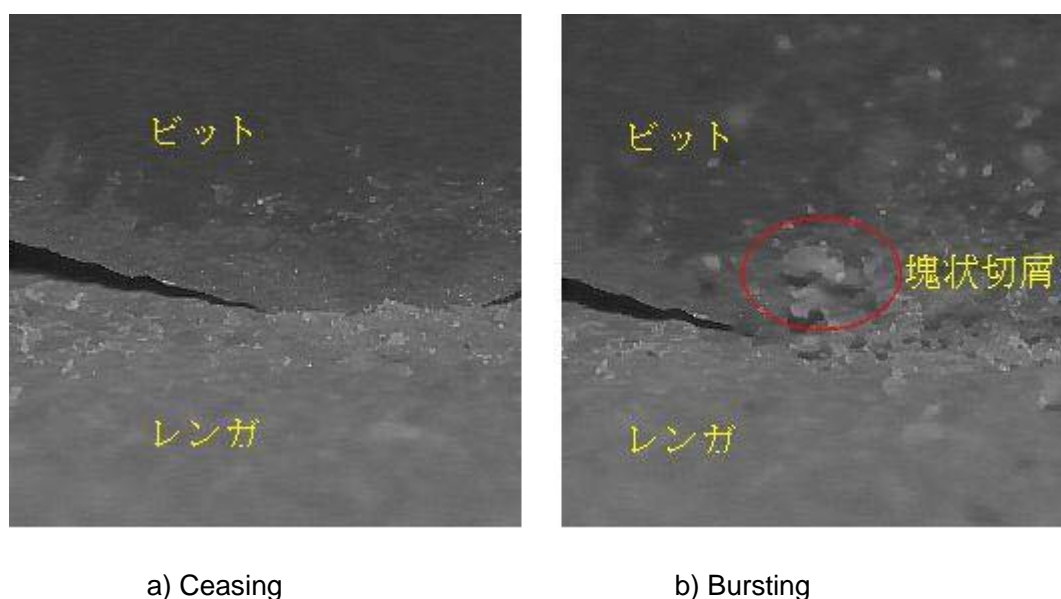


Figure 2.10: Two snap shots in the drilling process

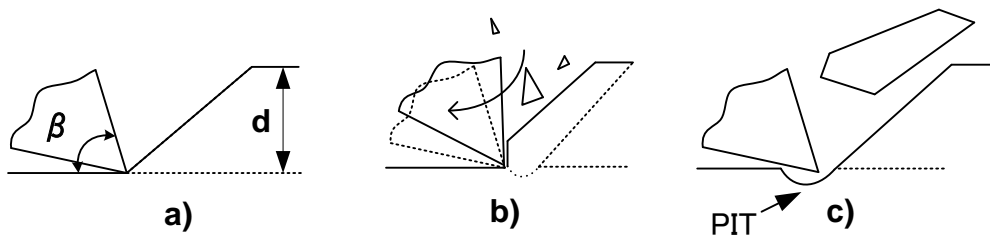


Figure 2.11: The failure mechanism of brick cutting process.

2.3.2 切削力の変化について

2.3.1 に述べた削孔装置を用い、580 rpm で連続削孔を行なった。その過程を、撮影速度 2000 fps、シャッタースピードを 1/6000 秒で録画し、削孔機械量（ストローク、回転数、推力、トルク、電力）をサンプリング周波数 10kHz で記録した。

主分力はトルクに比例するので、本実験では主分力の代わりに、トルクを測定した。Figure 2.12 に示すように、トルクは周期的に変化した。ロッドとビットの弾性変形とともに、トルクは上昇し (Figure 2.11 b) の状態)、局所破壊が発生する時、トルクは瞬時に降下する (Figure 2.11 c) の状態) と考えられる。すなわち、トルクの周期的変動は、Figure 2.11 の削孔過程と調和しており、削孔過程の妥当性を表している。他の研究者も同じ現象を観察している^{2,6,2,7)}。このレンガの切削過程は、巨視的には (例えば 1 回転に) トルクと回転速度が一定であるが、微視的には、トルクと回転速度は周期的に変化する。このような観察に基づいて、以下に岩石削孔のメカニズムを検討する。

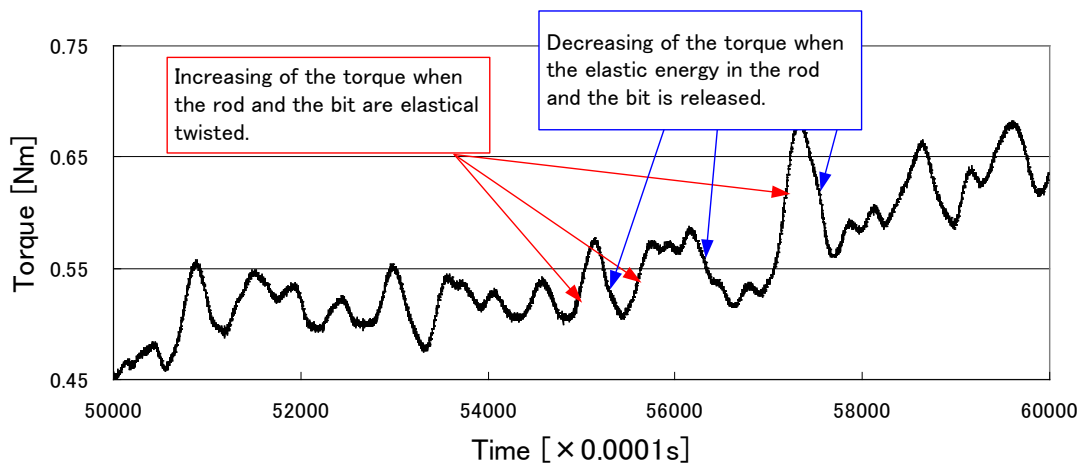


Figure 2.12: Torque of brick cutting process.

2.3.3 削孔過程のモデル化

上述の観察結果を基に、削孔過程モデルを提案する。Figure 2.13 に示すように、削孔過程はビットの送り運動と切削運動の連続サイクルからなる。ビットの送り運動は、ビット

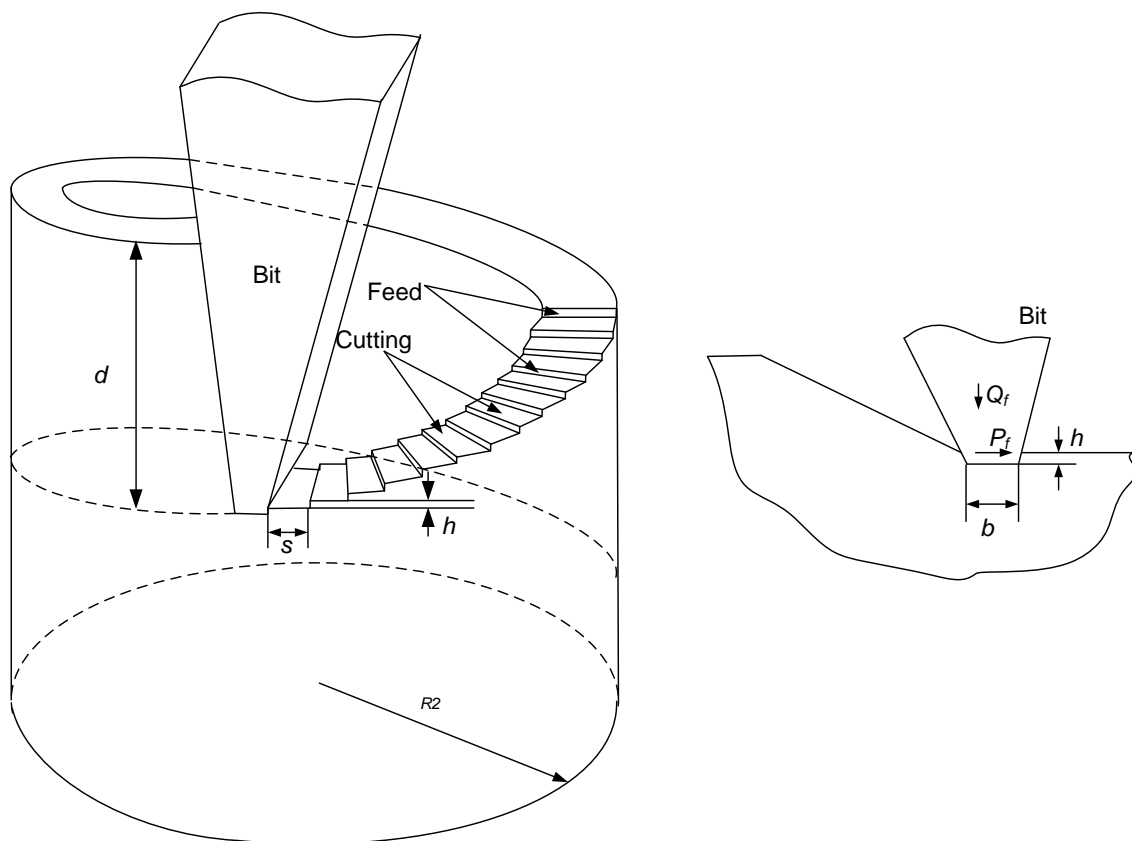


Figure 2.13: Cutting and feed movements of a drill bit.

の軸方向に沿って、新しい岩石に切り込む運動であり、切削運動は、ビットの回転方向に切屑を形成する運動である。Figure 2.13 では、1つのビットによる削孔過程を考える。 d は削孔深さ (mm/r) であり、 h は1サイクルあたりの削孔深さであるため、

$$d = h \cdot n_c \quad (2.11)$$

になる。ただし、 n_c は1回転あたりのサイクル数である。 s はビットが1回転した時の円周方向の移動距離、 r は回転半径である。 r と s の関係は $s = 2\pi r/n_c$ 、次式で近似できる。

$$s = \frac{2\pi R_2}{n_c} \quad (2.12)$$

ここで R_2 はビットの外径である。

このモデルによって、削孔運動はビットの送り運動と切削運動に分けられる。西松の岩石切削理論は切削運動に適用できるが、ビットの送り運動を考慮していない。本研究では、西松の切削モデルを拡張することにより、削孔中の切削過程をモデル化する。ビットの送り運動は、圧入 (indentation) や研削 (grinding)、磨潰 (crushing)、粉碎 (smashing) などの破壊過程を含むため、定量的に分析することが難しい。しかし、小型削孔機で削孔する場合に、 h の範囲は、0.1 mm 以下の僅かな量であるため、ビットの送り運動は圧入として

簡略化することができる。本研究では、Mateus^{2,8)}の圧入モデルを援用し、ビットの送り運動を分析する。

2.3.4 西松の切削モデルの拡張による切削運動の分析

西松の切削モデルは、脆性岩石の切削理論として認められている。しかし、削孔過程に応用するためには、刃先の摩擦と応力を考えなければならないので、モデルを拡張する必要がある。Figure 2.14 に拡張したモデルを示す。本来の西松の切削モデル (Figure 2.5) とほぼ同じであるが、刃先に「仮想底面」を加えている (図中 a_1a_4)。ここでは、「仮想底面」は切削平面に接しており、推力に応じて抗力を受ける。

Figure 2.14 には、 a_1a_3 はすくい面で、 a_1a_4 は仮想底面である。切削方向の力 P と推力 Q は、それぞれすくい面と仮想底面に作用する力を用いて次式で表せる。

$$\begin{aligned} P &= P_1 + P_2 \\ Q &= Q_1 + Q_2 \end{aligned} \tag{2.13}$$

ただし、ここでは P_1 はすくい面の切削方向の分力、 Q_1 はすくい面のビットの送り方向の分力である。これに対して、 P_2 は仮想底面の切削方向の分力、 Q_2 は仮想底面のビットの送り方向の分力である。

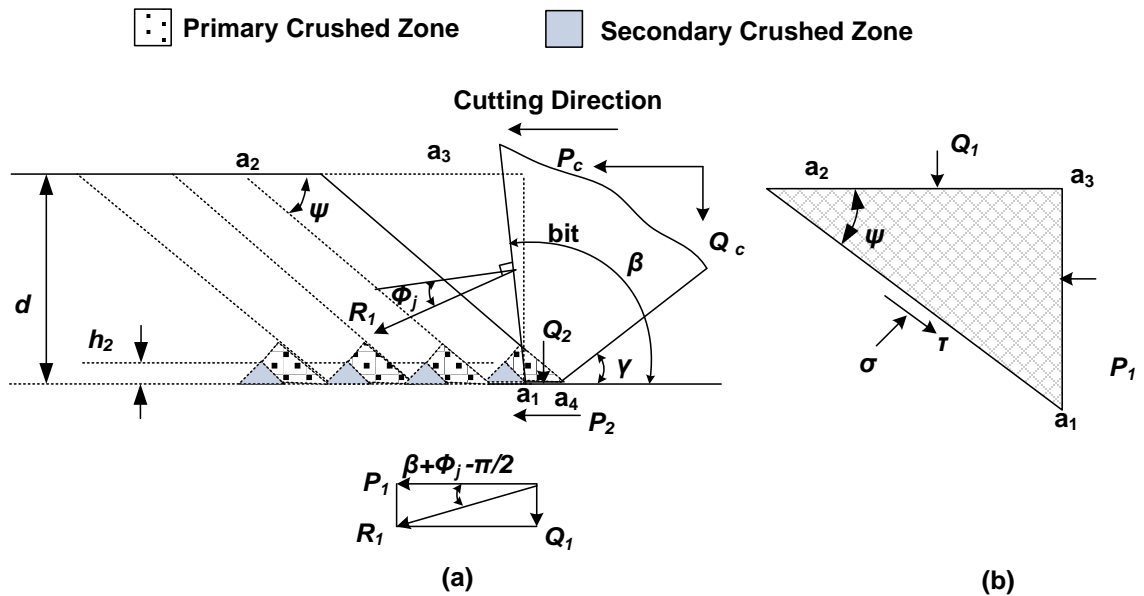


Figure 2.14: Expanding of Nishimatsu's model.

拡張したモデルに記号は変わったので，式(2.10)を次式で書き直す．

$$P_1 = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{(1 - \sin \phi_i) \sin(\beta + \phi_j)}{1 + \cos(\beta + \phi_i + \phi_j)} \cdot d \cdot C_0$$

$$Q_1 = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{(1 - \sin \phi_i) \cos(\beta + \phi_j)}{1 + \cos(\beta + \phi_i + \phi_j)} \cdot d \cdot C_0$$
(2.14)

上式を簡単に次式で表せる．

$$P_1 = k \cdot d \cdot C_0$$

$$Q_1 = k \cdot d \cdot C_0 \cdot \cot(\beta + \phi_j)$$

$$k = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{(1 - \sin \phi_i) \sin(\beta + \phi_j)}{1 + \cos(\beta + \phi_i + \phi_j)}$$
(2.15)

k はビット形状と岩石物性と関係がある係数である．

西松の研究によると，ビットの切削と同時に，Figure 2.14 に示した二次的な破砕領域 (Secondary Crushed Zone) が形成される．この破壊領域はビットの圧入過程によると仮定すると，その際の切削力は，岩石の一軸圧縮強度に比例することになる (2.3.5 に参照)．本研究では，二次的な破砕領域の形成過程で切削力と仮想底面に作用する摩擦力を仮定する．その場合，水平力 P_2 と垂直力 Q_2 は一軸圧縮強度に比例する．作用面積 (二次的な破砕領域) はほぼ一定なので， P_2 と Q_2 は次式で表せる．

$$P_2 = k_1 C_0$$

$$Q_2 = k_2 C_0$$
(2.16)

ここで， k_1 と k_2 は係数である．

2.3.5 Mateus の理論とビットの送り運動の分析^{2,8)}

2.3.1 に述べたように，削孔のビットの送り運動は断続的な軸方向の運動である．巨視的には，ビットの送り運動により，ビットは岩石を切り込む．しかし，実際の切り込のメカニズムを直接観察するのは困難である．ビットの送り運動は，圧入 (indentation) や研削 (grinding)，磨潰 (crushing)，粉碎 (smashing) などの破壊過程を含むため，定量的に分析することが難しい．本研究では，ビットの送り運動を圧入仮定する．圧入に関する理論としては，Mateus の圧入理論を援用する．

Mateus et al. の試験と結果は次のようになる．砂岩 (一軸圧縮強度は 15-210 MPa である) の試料 21 個を用いた．それぞれの試料の先端から 5 mm の厚さの円盤を作製した．円盤を分割し，直径が 4mm 以上の試験片 50 個以上を作製した．試験片の両端面は平行に加工された．金属製平面インデーターを用いて，0.01 mm/s の圧入スピードで圧入深さが 0.3mm になるまで圧入試験を行なった (Figure 2.15)．インデーターの円柱形の先端部は直径が 1 mm で，長さが 0.5 mm である．荷重と圧入深さを計測して，圧入係数 IM (Indentation

Modulus) を計算した.

$$IM = \frac{\Delta N}{\Delta d_i} \quad (2.17)$$

IM : 圧入係数(kN/mm)

ΔN : 荷重の変化量 (kN)

Δd_i : 圧入深さの変化量(mm)

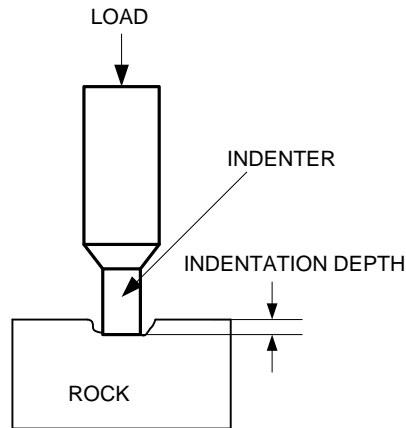


Figure 2.15: Mateus's indentation model^{2,8)}.

岩石物性のバラつきや測定誤差の影響を考慮して、複数の圧入試験を行なっている。一軸圧縮強度と圧入係数の回帰分析を行ない、次の回帰式を得ている。

$$C_0 = k_m \cdot IM \quad (2.18)$$

ただし、 k_m は定数である。 $k_m = 17.38$ (MPa×mm/kN)。

この式は、岩石の一軸圧縮強度が圧入係数と比例関係があることを示している。ここでこの圧入係数の単位は kN/mm であるが、MPa/mm にすれば合理的に圧入の効果を表せると考える。本研究では、Mateus の圧入理論を援用して、圧入強度 IS を導入し、荷重の変化量の代わりに応力の変化量で表す。

$$IS = \frac{\Delta P}{\Delta d_i} \quad (2.19)$$

IS : 圧入強度

Figure 2.13 に示す削孔分析モデルにおいて、ビットを圧入試験用のインデントーとみなし、式(2.19)を適用すると、

$$IS = \frac{Q_f / b}{h} = \frac{2\pi R_2 Q_f}{bds} \quad (2.20)$$

になる。上式では、単位厚さ当りの圧入強度を表している。ここで、式(2.18)に従い、一軸圧縮強度を表すと、次のようになる。

$$C_0 = k_{it} \cdot IS \quad (2.21)$$

ただし、 k_{it} は定数である。圧入とビットの切込のメカニズムは異なるため、 k_{it} を k_i に代えると、ビットの仮想底面の圧力は次式で表せる。

$$Q_f = \frac{k_{it} b \cdot d \cdot s}{2\pi R_2} \cdot C_0 \quad (2.22)$$

ビットの仮想底面の摩擦力は

$$P_f = Q_f \tan \phi_j = \frac{k_{it} b \cdot d \cdot s \cdot \tan \phi_j}{2\pi R_2} \cdot C_0 \quad (2.23)$$

になる。

2.3.6 削孔のトルク

これまでの分析では、削孔中のビットの送り運動と切削運動を分けて分析してきたが、実際の削孔過程では、両者は同時に起こる。その場合の円周方向の力の総和は

$$P = P_1 + P_2 + P_f \quad (2.24)$$

になる。トルクの総和は次式で表せる。

$$T = \int_{R_1}^{R_2} (P_1 + P_2 + P_f) r dr + T_i \quad (2.25)$$

T_i : 空転時の削孔機のトルク。

R_1 : ビットの内径。

R_2 : ビットの外径。

式(2.14)、(2.16)と(2.23)を式(2.25)の右辺に代入し、積分すると、トルクの総和は次式で表される。

$$T = k_c \cdot d \cdot C_0 + k_r C_0 + k_f b \cdot d \cdot C_0 + T_i \quad (2.26)$$

ただし、

$$k_c = \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2(n+1)} \cdot \frac{(1 - \sin \phi_i) \sin(\beta + \phi_j)}{1 + \cos(\beta + \phi_i + \phi_j)}$$

$$k_r = \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2} \cdot k_2$$

$$k_f = \frac{k_{it} \cdot s \cdot \tan \phi_j \cdot (R_2 - R_1)}{2\pi}$$

は係数である。これらの係数はビット形状や磨耗程度、岩石性質に決まる。ビット形状と磨耗程度が同じでも、岩石の種類によって、岩石の内部摩擦角 ϕ_i と、岩石とビットの間の摩擦角 ϕ_j も異なるので、これらの係数が変化する。しかし、一軸圧縮強度の変化幅に比べると、係数の変化幅は遥かに小さい^{2.7)}。そのため、ビット形状と磨耗程度が一定の場合には、係数 k_c , k_r , k_f を定数とみなせる。

式(2.26)によると、削孔トルクの総和は4つの部分からなる。

- ① 切削トルク $k_c d C_0$;
- ② ビット逃げ面の摩擦トルク $k_r C_0$;
- ③ ビットの送り運動によるトルク $k_f b d C_0$;
- ④ 削孔機の空転トルク T_i .

これより、削孔トルクの総和と一軸圧縮強度が比例関係にあることが分かる。

上述の削孔分析モデルと計算式は 1 つの刃を持つビットに基づいたものである。ビットに n 個の刃がある場合には、推力が一定であれば、削孔深さ (mm/r) は 1 つの刃の場合と同じである。しかし、個々の刃に作用するトルクは $1/n$ になる。そのため、刃の数に応じて、刃の破損や磨耗が減少すると考えられる。

2.3.7 削孔体積比エネルギー

1.2.3 で述べたように、Teale^{1,34)}は体積比エネルギーを次式で定義した。

$$E_s = \frac{F}{A} + \frac{2\pi NT}{Au} \quad (2.27)$$

ここで、 E_s は体積比エネルギー、 F は推力、 A は削孔断面積、 N は回転数、 T はトルク、 u は削孔速度である。本研究では、1 項を推力エネルギー、2 項を回転エネルギーと呼ぶ。

Figure 2.16 には、豪州 Gujarat NRE No. 1 炭鉱で行なった現場削孔試験^{2,9)}の 1 例である。推力エネルギーは回転エネルギーの約 1/20-1/60 に過ぎないことが確認された。また、他の 11 個の孔についても、同様な結果が確認された。すなわち、体積比エネルギーを次式で近似可能である。

$$E_s = \frac{2\pi T}{Ad} \quad (2.28)$$

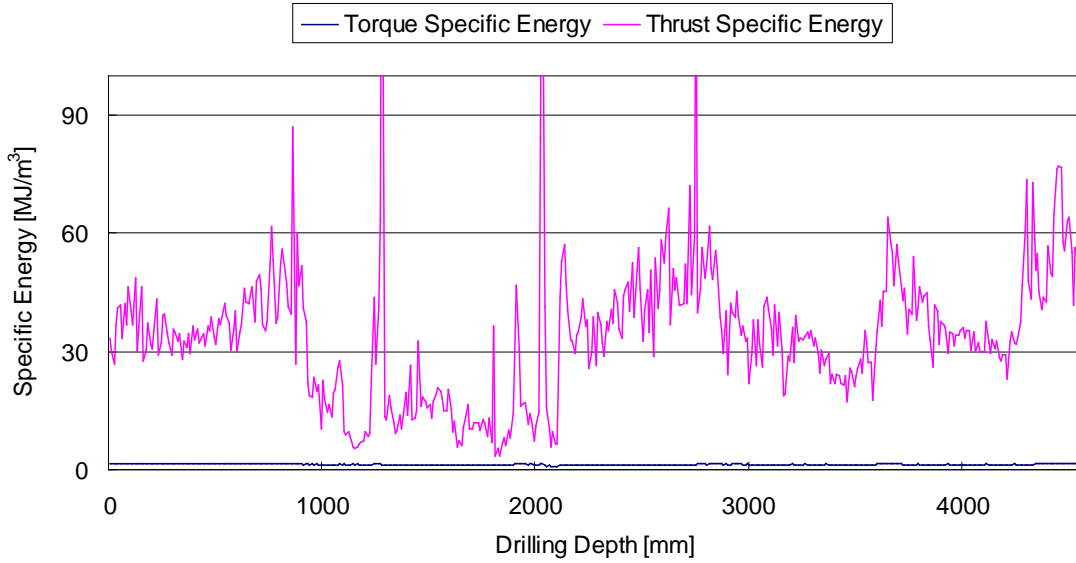


Figure 2.16: Comparison between thrust specific energy and torque specific energy.

式(2.26)を式(2.28)に代入すると，体積比エネルギー E_s と削孔深さ d (mm/r) の関係は

$$E_s = \frac{2\pi}{A} \left(\frac{k_r C_0 + T_i}{d} + k_c C_0 + k_f b \cdot C_0 \right) \quad (2.29)$$

になる。

式(2.26)によると，右辺の第2項（摩擦トルク）と第4項（空転トルク）は削孔深さ (mm/r) に独立である。また，式(2.29)によると，体積比エネルギー E_s と削孔深さ (mm/r) d の間には，反比例関係がある。同じな削孔機とビットを使って，同じ削孔条件の下では，体積比エネルギーは削孔深さ (mm/r) d により変動する。

本研究では，式(2.26)の右辺の第2項（摩擦トルク）と第4項（空転トルク）は削孔に関わらない成分なので，これを除いたものを有効トルク (T_e) と呼ぶ。

$$T_e = k_c \cdot d \cdot C_0 + k_f \cdot b \cdot d \cdot C_0 \quad (2.30)$$

有効トルクによって計算する体積比エネルギーは，有効体積比エネルギー (EEs) と呼ぶ。

$$EEs = \frac{2\pi T_e}{Ad} \quad (2.31)$$

$$EEs = \frac{2\pi}{A} (k_c C_0 + k_f b \cdot C_0) \quad (2.32)$$

式(2.32)により，有効体積比エネルギーは一軸圧縮強度に比例する。すなわち，有効エネルギーから岩石の一軸圧縮強度を推定できることを示唆している。

2.4 削孔理論がダイヤモンドビットへの適用

本研究で提案した削孔理論はダイヤモンドビットへも適用できる。ダイヤモンドビットの場合には、それぞれの露出したダイヤモンド粒子が1つの切削刃とみなせる (Figure 2.17)。この時の削孔トルクを式(2.26)により表すことができる。ただし、式(2.26)の右辺の第3項には、ビットの仮想底面の面積を含まれており、刃先の磨耗による圧入と切削への影響を反映する。ダイヤモンドビットの粒子は磨耗もするが、切削とともに、新しい粒子がマトリックスから次々に露出する仕組みであるため、全体にビットの磨耗が削孔トルクに与える影響が少ないと考える。すなわち、ダイヤモンドビットの場合には、磨耗を考慮しなくても良いため、仮想底面の b は定数として扱える。ダイヤモンドビットの削孔トルクを次のように表される。

$$T = k_c \cdot d \cdot C_0 + k_r C_0 + k_f \cdot d \cdot C_0 + T_i \quad (2.33)$$

ここで、 k_c 、 k_r と k_f はダイヤモンドビットの切削性能、ビットと岩石の摩擦係数、圧入強度による決まる係数である。体積比エネルギーと有効体積比エネルギーの計算式は

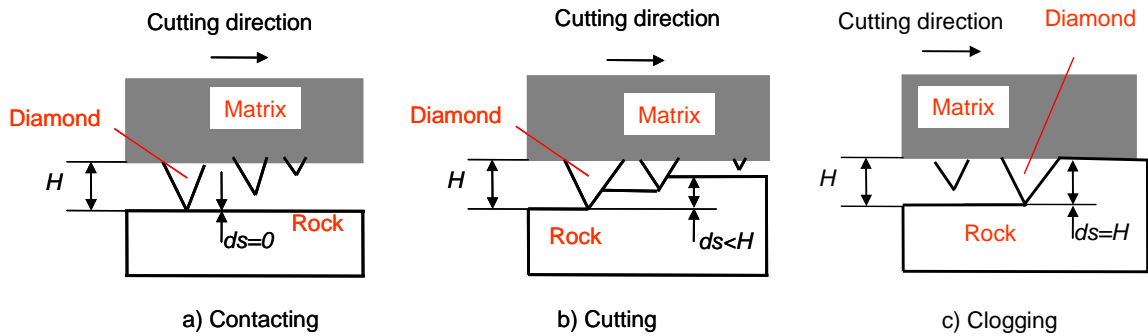


Figure 2.17 Cutting process of impregnated diamond bit

$$Es \approx \frac{2\pi}{A} \left(\frac{k_r C_0 + T_i}{d} + k_c C_0 + k_f b \cdot C_0 \right) \quad (2.34)$$

$$EEs = \frac{2\pi}{A} (k_c C_0 + k_f C_0) \quad (2.35)$$

となる。

2.5 本章のまとめ

本章では、実験に高速ビデオカメラを用いて、切削型ビットの回転式削孔過程を観察することにより、削孔分析モデルを構築した。以下に得られた結果を述べる。

- 1) 提案したモデルは、削孔過程が連続的な切削とビットの送りの2つの運動で表す。
- 2) 切削運動については、西松の切削理論に基づき、ビットの刃先に「仮想底面」を仮定し、刃先に作用する推力と摩擦力を誘導した。

3) ビットの送り運動は圧入過程とみなし、Mateus の圧入理論を援用した。ビットの「仮想底面」の面積や、ビットの送り抗力と一軸圧縮強度の関係式を導いた。

4) 切削とビットの送り運動を合わせて考慮し、削孔トルクと体積比エネルギーの関係式を誘導した。

① トルク総和は切削トルク，逃げ面の摩擦トルク，ビットの送りトルクと空転トルクの4つの部分から構成する。

② 同じように，削孔の体積比エネルギーは，切削，摩擦，ビットの送りと空転による4つの項目からなる。逃げ面の摩擦力と削孔機の空転によるトルクは削孔エネルギーと関わらない成分である。

③ 有効体積比エネルギーは，ビットの送り速度に独立であり，一軸圧縮強度との間に比例関係が存在する。

5) 提案した削孔分析をモデルダイヤモンドビットに適用することにより，モデルの汎用性を示した。

参考文献

- 2.1) Merchant, M.E., Mechanisms of Metal Cutting Process, Journal of Applied Physics, Vol. 16 pp. 267-275, 1945.
- 2.2) Viktor P. Astakhov, Metal Cutting Theory - Missed Chances or A Science without History, <http://viktorastakhov.tripod.com>
- 2.3) Evans, I., A Theory on the Basic Mechanics of Coal Ploughing, Proceedings of the International Symposium on Mining Research, Pergamon, London, Vol. 2, pp. 761-798, 1962.
- 2.4) Nishimatsu, Y., The mechanics of rock cutting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 9, 1972, pp. 261-270.
- 2.5) Gunes, Y. N., Yurdakul, M. and Goktan, R.M., Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 44(6), September 2007, pp. 962-970.
- 2.6) Dalziel, J. A. & Davis, A., Initiation of Cracks in Coal Specimens by Blunted Wedges, The Engineering, Vol. 127, pp. 217-220, January 1964.
- 2.7) Bisschop, F., The Analysis of a Laboratory Cutting and Abrasion Test to Be Applied in Rock Cutting Dredging, Memories of the Center for Engineering Geology in the Netherlands, No. 81, 1991.
- 2.8) Mateus, J., Saavedra, N. F., Carrillo, Z. C. and Mateus, D., Correlation Development between Indentation Parameters and Uniaxial Compressive Strength for Colombian Sandstones. C.T.F Cienc Tecnol Futuro, 2007, Vol. 3(3), pp. 125-35.
- 2.9) Li, Z., Itakura, K., Tomita, S., Iguchi S, Ichihara, Y., Mastalir, P., Prediction of Rock Strength

From Rotary Drill Performance Parameters, Proceedings of the 2009 Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, Suwon, Korea, 2009, pp. 57-65.

第3章 室内削孔試験

3.1 はじめに

削孔中に各種機械量データを計測，記録，表示することは，MWD（Measurement While Drilling）と呼ばれ，石油掘削，海洋掘削を始めとする比較的大規模掘削では日常的に行なわれている．本章では，第 2 章で述べた削孔理論の妥当性を検証し，天盤検層システムの開発に資する実験データを得るために，室内 MWD 装置を作製し，削孔実験を行なった．すなわち，具体的には以下の項目を行なった．

- 1) 室内 MWD システムの開発
- 2) 室内試験により，削孔分析モデルと計算式の検証
- 3) 室内試験により，岩石強度の推定方法の検討
- 4) 室内試験により，不連続面の検出方法の検討

以下には，室内 MWD 装置のハードウェアとソフトウェアを紹介し，室内実験の方法と結果について述べる．

3.2 室内 MWD 装置のハードウェアシステム

削孔機械量データを計測できるよう，卓上ボール盤(日立工機 B13RH)に，変位計，トルク計，回転計，荷重計と電力計を取り付けた室内削孔実験装置を作製した．この装置のシステム図を，Figure 3.1 に示す．また，装置の写真を，Figure 3.2 に示す．削孔中の各センサからの出力を，シグナルコンディショナを介してデータレコーダに記録した．各センサ及びデータロガーの仕様を，Table 3.1 に示す．

卓上ボール盤 B13RH は，手動で削孔推力や削孔深さを調整する．軸方向の最大送り量は 80 mm である．回転数は 500-3000 rpm であるが，岩石削孔に適応するために，約 580, 1000, 1500 rpm の 3 段階の回転数に改造した．モータの最大出力は 300 W である．

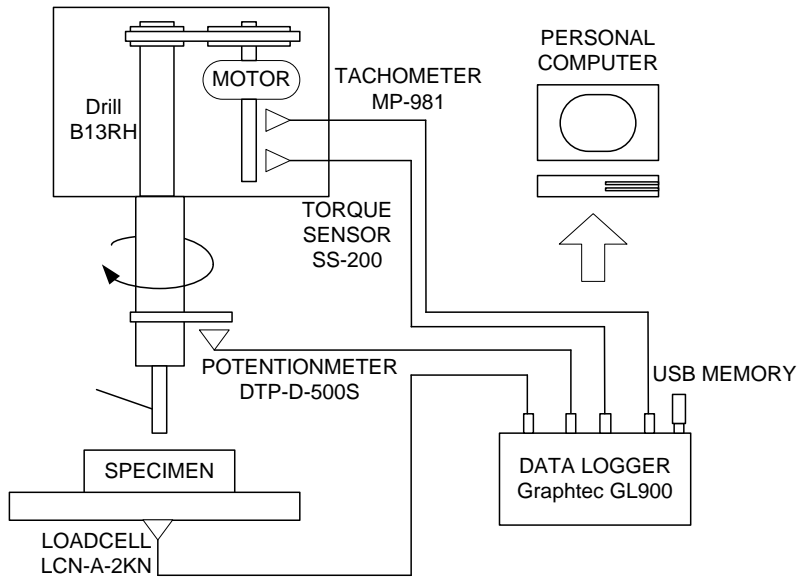


Figure 3.1 MWD concept in the laboratory experiments.

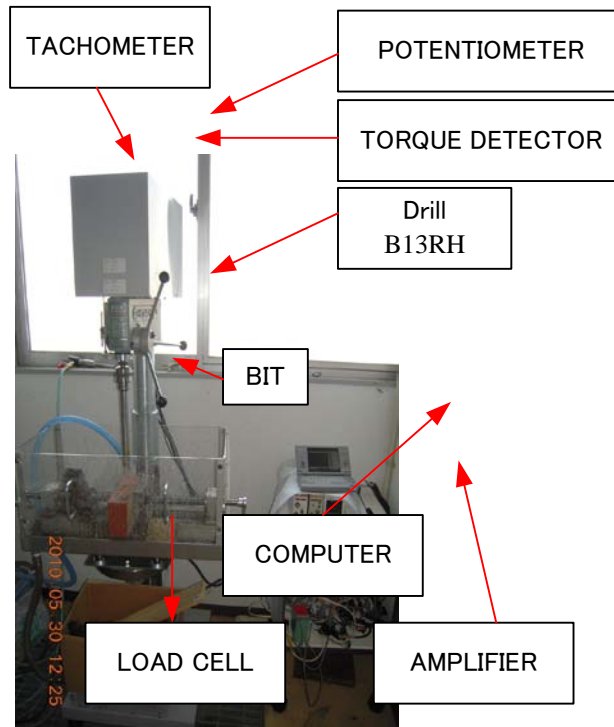


Figure 3.2: MWD in the laboratory experiments.

Table 3.1: Specifications of sensors in laboratory MWD

Mechanical Data	Model Number	Rated Capacity	Producer
Torque	SS-200	20 Nm	ONO SOKKI CO., LTD.
Thrust	LCN-A-2KN	2 kN	Kyowa Electronic Instruments Co., LTD
Stroke	DTP-D-500S	500 mm	Kyowa Electronic Instruments Co., LTD
Rotational Speed	MP-981	20000 rpm	ONO SOKKI CO., LTD.
Power	PTD-1		U.R.D.Co., LTD.

3.3 ソフトウェアシステム

計測したデータを USB メモリで一時的に保存し、削孔終了後、コンピュータに転送する。データ処理の流れを Figure 3.3 に示す。以下硫化鉱物（強度が約 20 MPa）を用いた削孔試験のデータを例として、各ステップの概要を説明する。

- 1) 記録したデータ（電圧値）を機械量データに変換する。Figure 3.4 は電圧値のグラフである、換算した機械量を Figure 3.5 に示す。
- 2) 削孔停止時間のデータを削除する。
- 3) 処理目的により、一定の削孔長（例えば、1 mm, 10 mm）毎に平均機械量を求める。この処理により、推力、トルクと削孔速度の例を Figure 3.6 に示す。
- 4) 一定の削孔長毎に削孔深さ（mm/r）や体積比エネルギー、トルク/推力などの計算を行ない、結果を出力する（Figure 3.7）。
- 5) 岩石強度を推定、不連続面の位置を検出する。

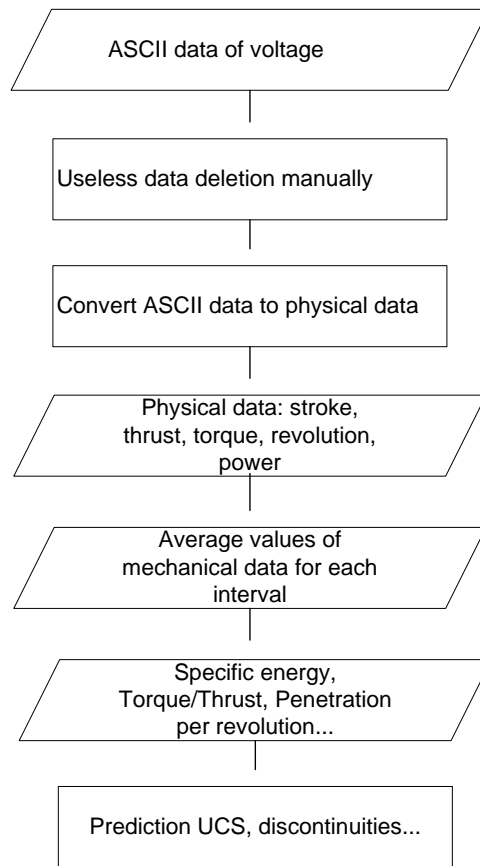


Figure 3.3: Data process flowchart

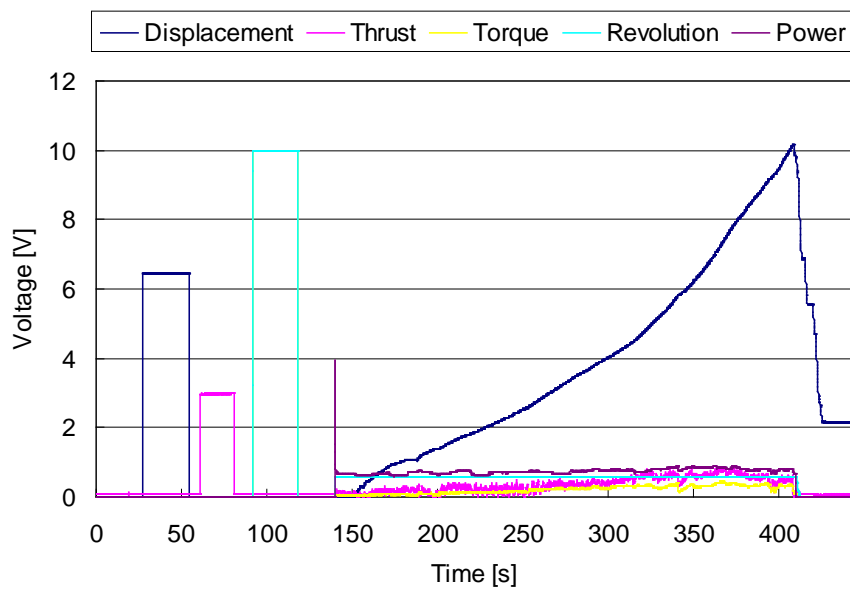


Figure 3.4: Mechanical signals with serial numbers. In this case, the frequency of sampling is 10Hz.

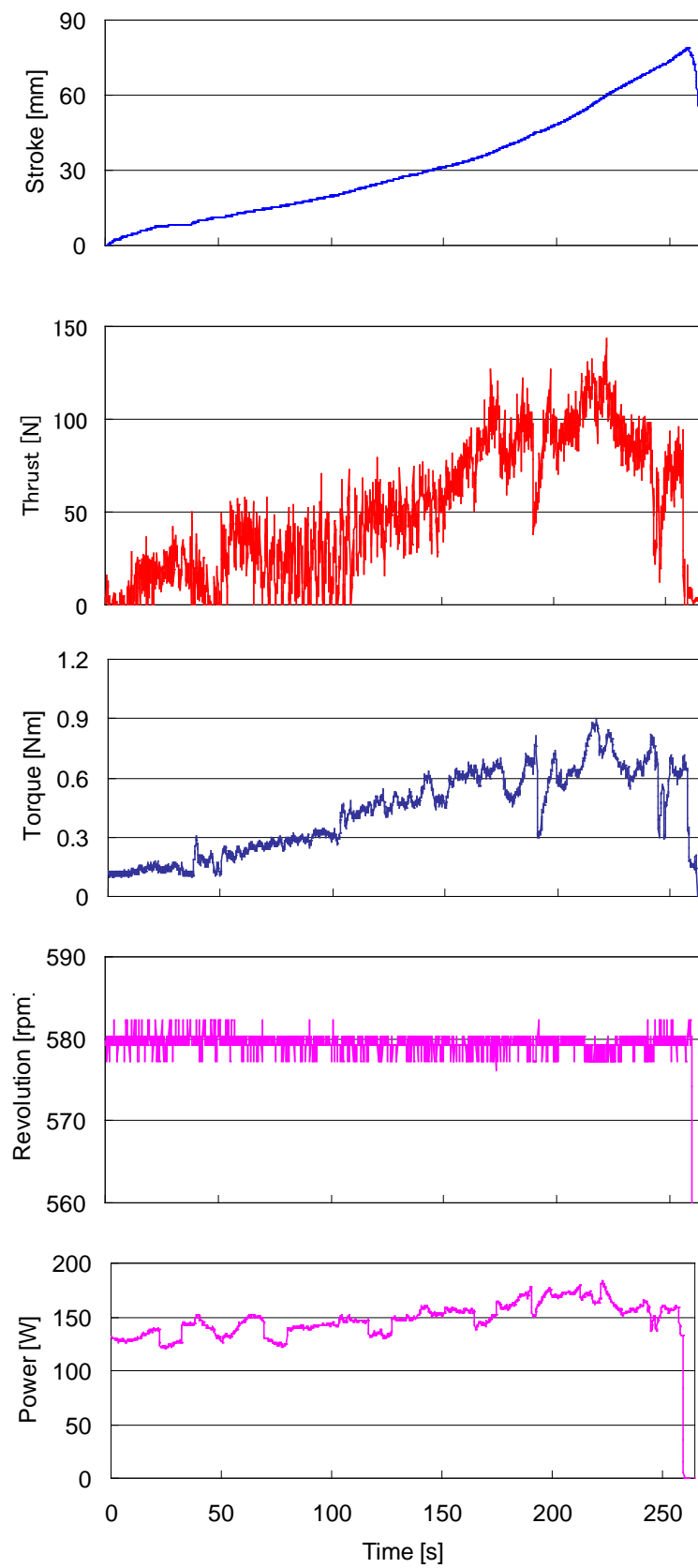


Figure 3.5: Stoke, thrust, torque, revolution and power in time series. In this case, the frequency of sampling is 10Hz.

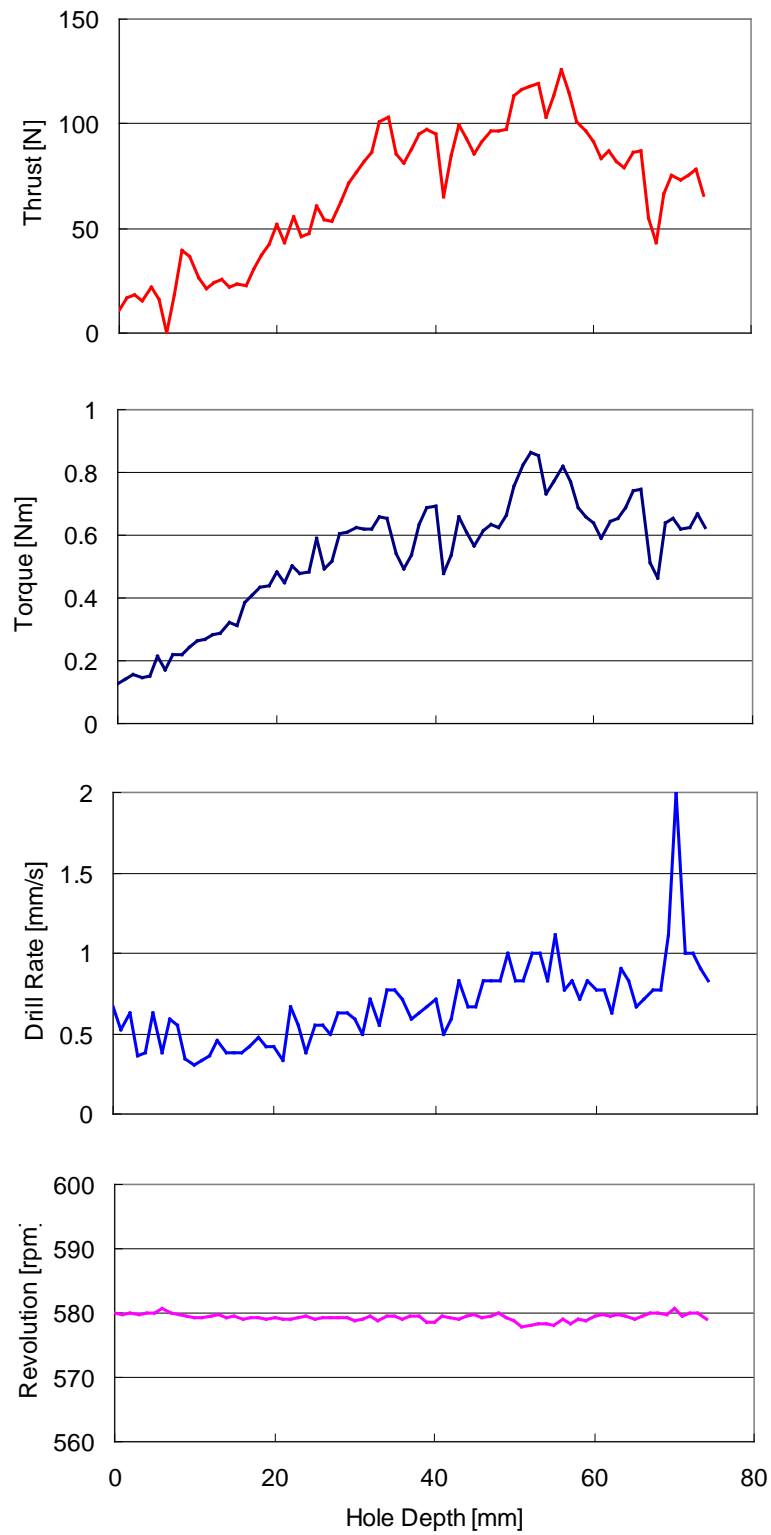


Figure 3.6: Average mechanical data (Thrust, Torque, Drill rate and Rotary rate) for each depth interval.

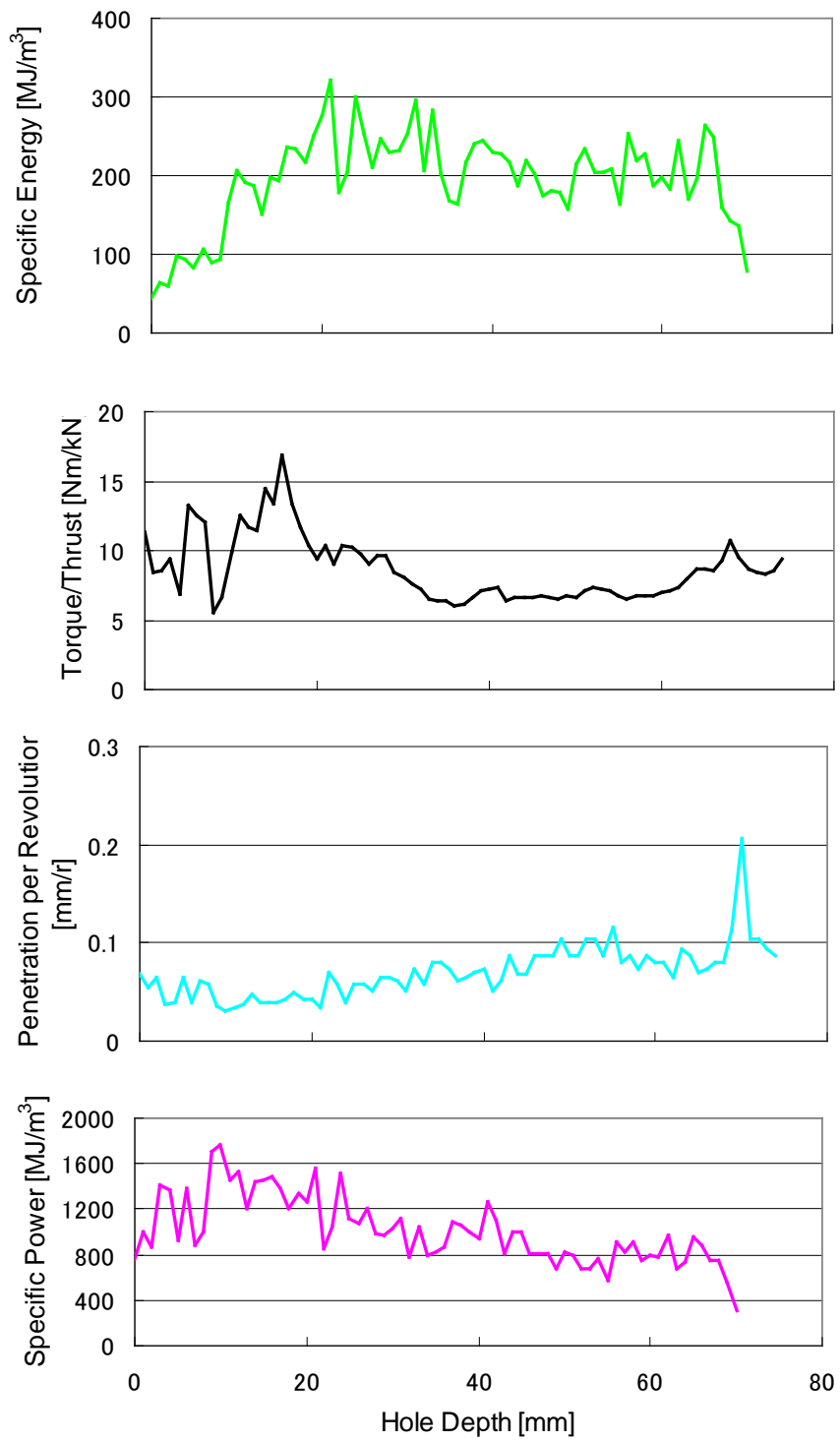


Figure 3.7: Average mechanical data (penetration per revolution, torque/thrust, specific energy, specific power) for each depth interval.

3.4 室内削孔試験結果

3.4.1 推力の変動による機械量諸元の変動傾向

本研究で開発した室内 MWD システムを利用し、Figure 2.7 に示す切削型ビット（直径 28 mm）を用いて、削孔試験を行なった。試験材料は硫化鉍の鉍石である。回転数は約 580 rpm である。手動で推力を与え、推力の変動により機械量諸元の変動傾向を検討した。

推力を約 80 N、110 N と 220 N の 3 つの段階で与えた。推力の変動に応じたトルクや、削孔深さ (mm/r)、体積比エネルギー、トルク/推力を Figure 3.8 に示す。

Figure 3.8 から、推力が大きいほどトルクと削孔深さ (mm/r) が上昇するのがわかる。一方、体積比エネルギーは低下する傾向にある。トルク/推力も推力の変動に応じて変化することが分かった。

3.4.2 削孔トルクと一軸圧縮強度の関係

第 2 章に誘導した計算式(2.26)を検証するために、Figure 2.7 に示すような Two-Wing ビット(D4MB-1628-26, Sandvik Mining and Construction)を用いて、削孔試験を行なった。削孔対象は石膏、セメント、レンガと硫化鉍の 4 種類で、それぞれの一軸圧縮強度は 0.3, 6.5, 12, 20 (単位: MPa) である。回転速度を 580 rpm, 1 回転当たりの削孔深さを 0.5mm 以内に設定し、それぞれの材料に対して 20 mm 以上の深さまで削孔した。記録した削孔データを整理し、トルクと削孔深さ (mm/r) の関係を Figure 3.9 に示す。Table 3.2 には、Figure 3.9 に示す各直線の傾き及び切片を示す。各直線の傾き及び切片は材料の一軸圧縮強度に比例している。式(2.26)に示す削孔トルクと一軸圧縮強度の間の比例関係が検証された。

3.4.3 逃げ面（仮想底面）の面積がトルクに与える影響

Figure 3.10 に示すように、ビットを新品から 3 段階に改造して、削孔試験を行なった。試験材料はレンガである。Figure 3.11 は、トルクー削孔深さ (mm/r) の関係を示している。同図より、仮想底面の長さ b によって傾きが異なることが分かる。すなわち、式(2.26)の第 3 項の $k_f b d c_0$ の影響を表している。この結果は、ほかの材料もまとめられた。

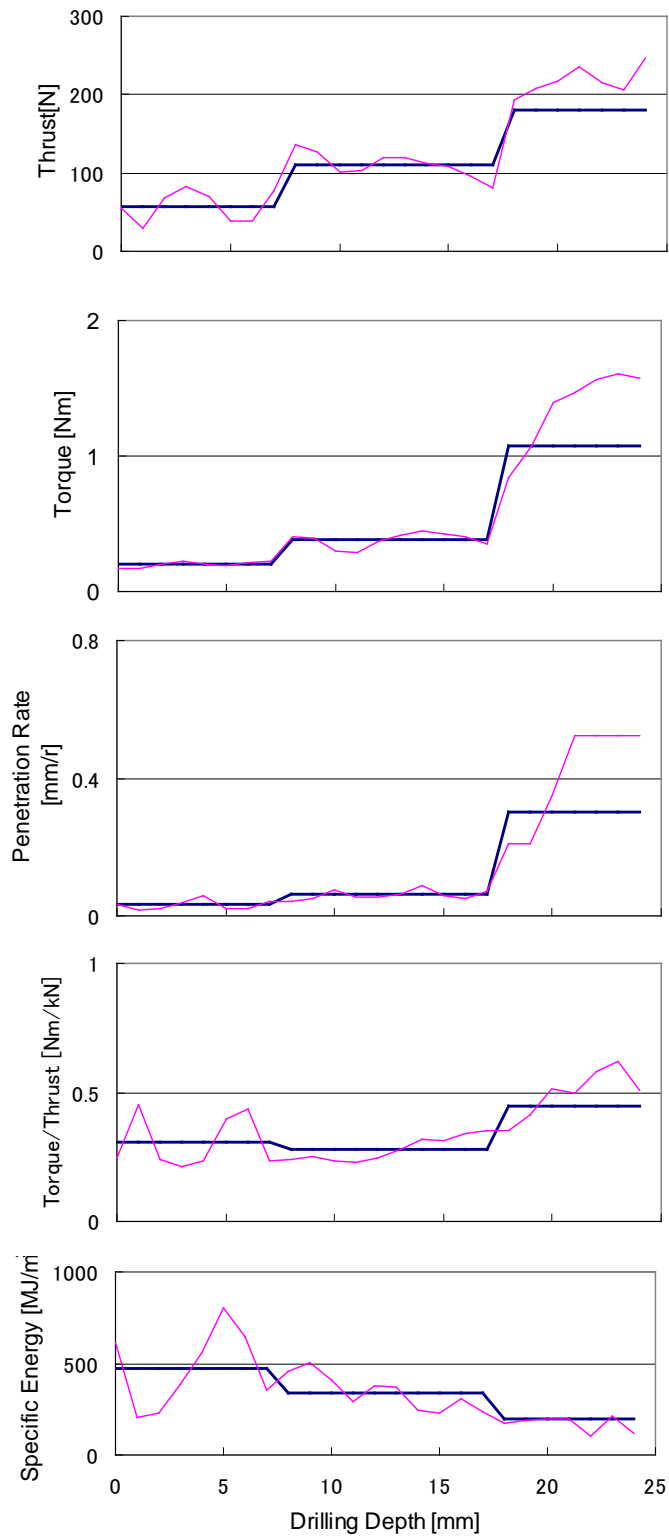


Figure 3.8: Variations of mechanical data when thrust increases.

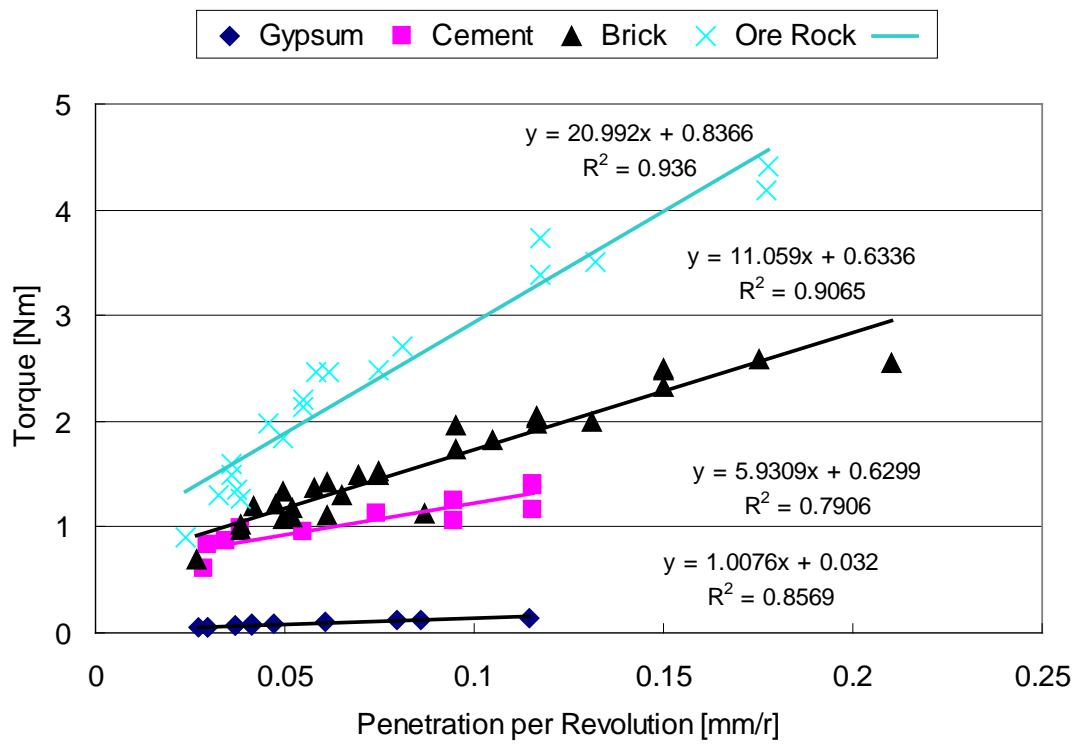


Figure 3.9: Relation between torque and PPR (a new bit).

Table 3.2: Slopes and intercepts of the PPR-Torque lines

Material	UCS[MPa]	Slope	Intercept
Gypsum	0.3	1.01	0.03
Cement	6.5	5.93	0.63
Brick	12	11.06	0.63
Ore Rock	20	20.99	0.84

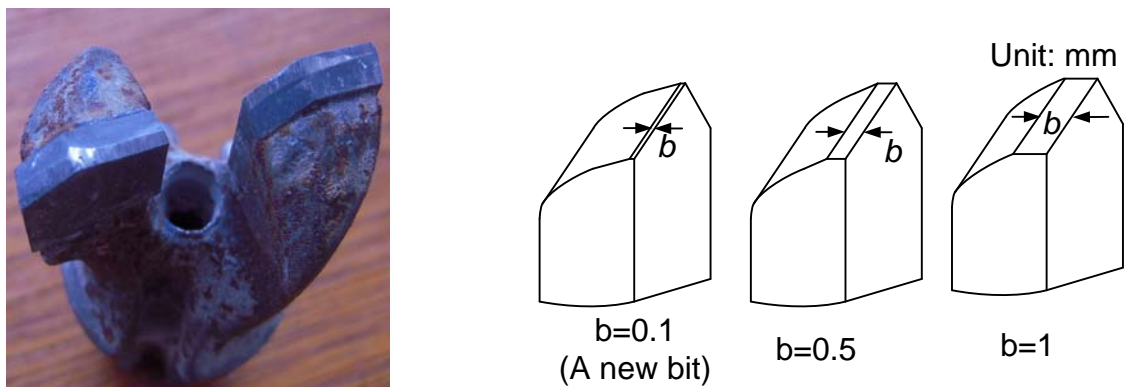


Figure 3.10: The two-wing bit and its reshaping.

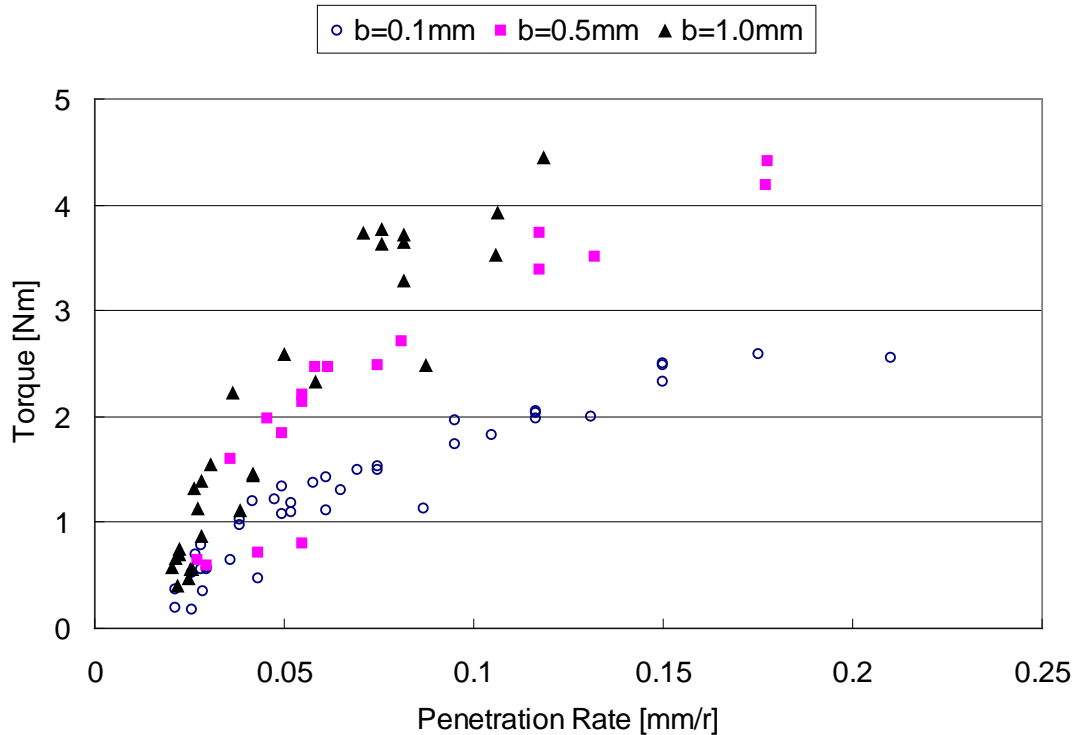


Figure 3.11: Contact length and PPR-Torque relationship.

3.4.4 削孔体積比エネルギーと一軸圧縮強度の関係の検証

3.4.2 で行なった試験結果を用いて、石膏、セメント、レンガと鉍石の削孔体積比エネルギーを計算した (Figure 3.12). 材料の強度が高いほど、体積比エネルギーも高い傾向が見られた. 体積比エネルギーによる一軸圧縮強度の推定が可能であることを示唆している. 一方, Figure 3.12 に示すように, 体積比エネルギーは深さに沿って変動する. Figure 3.13 に示すように, 削孔深さ (mm/r) が小さいほど, 体積比エネルギーが大きくなる傾向がある. この傾向は, 2.3.7 に述べた計算式(2.29)と整合している. 以下, 3.4.2 で行なった試験データを例として, 体積比エネルギーから一軸圧縮強度を推定するについて, 3つの方法を検討する.

方法 1): 体積比エネルギーの総和から直接的に一軸圧縮強度を推定する方法^{2.9)}.

削孔全長に渡る体積比エネルギーの平均値を用いて, 岩石の一軸圧縮強度を推定する方法である. Figure 3.14 の直線は, 各岩石の体積比エネルギーの平均値を示している. 岩種による違いが見られ, 岩層の特定および一軸圧縮強度を推定できる可能性を示している.

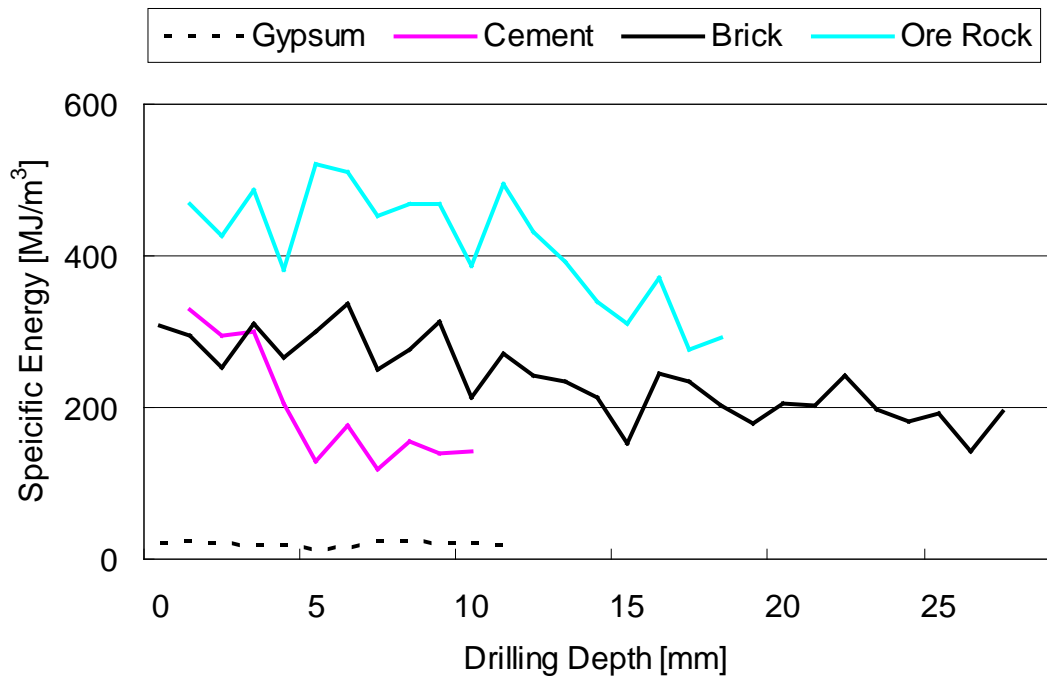


Figure 3.12: Drilling specific energy in depth-series

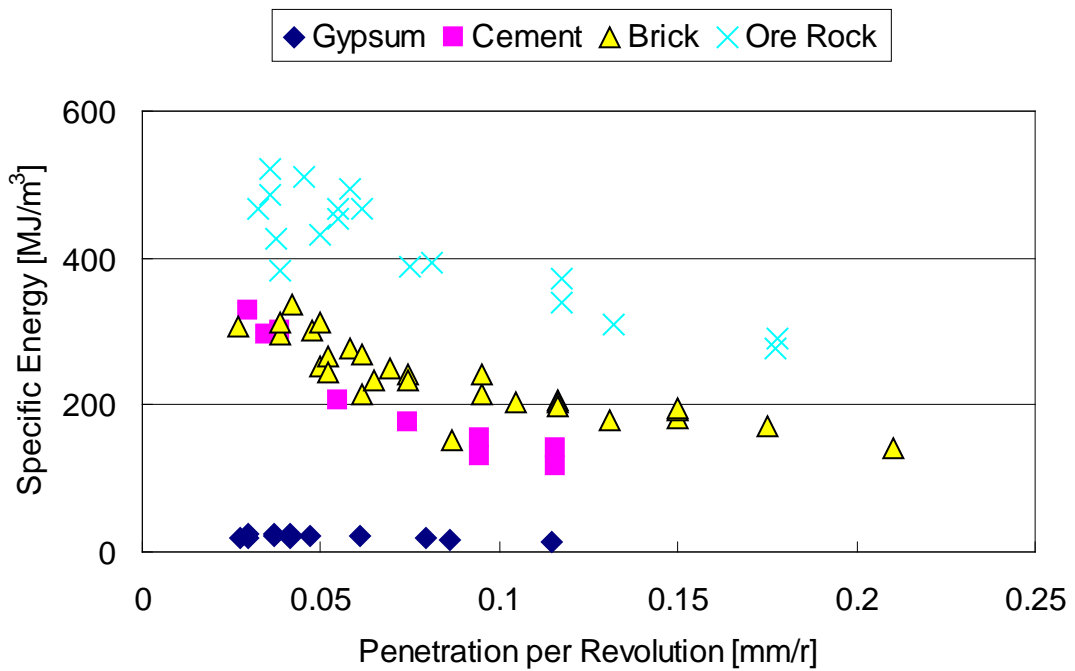


Figure 3.13: Drilling specific energy VS Penetration per revolution.

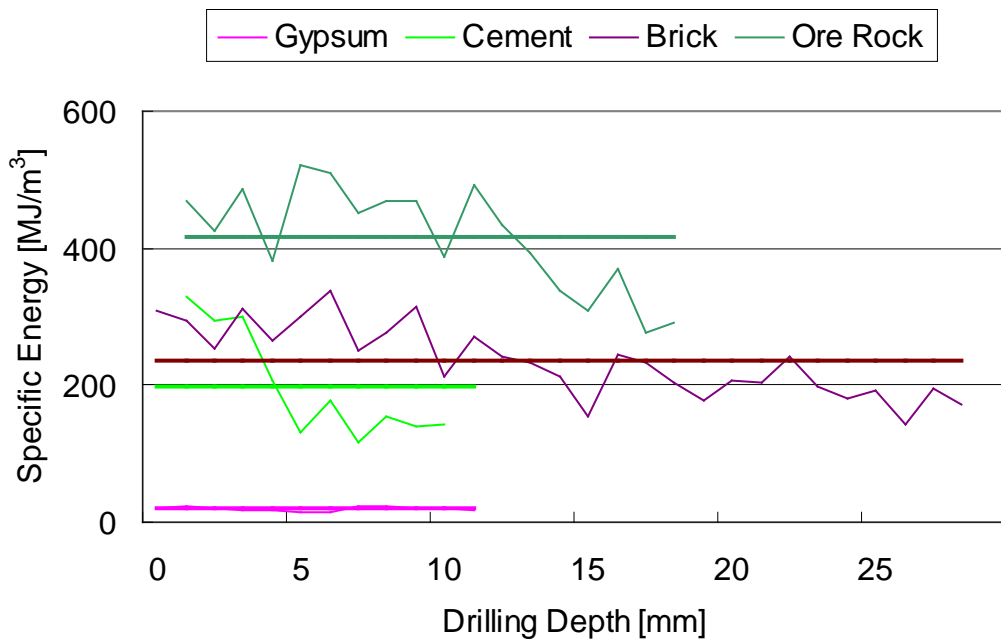


Figure 3.14: Specific energy VS its average value.

方法 2) : 有効体積比エネルギーを求めるに当って、無効なトルクを取り除くことができない場合、一定の削孔深さ (mm/r) に対応した体積比エネルギーを比較する方法である。例えば、0.05-0.125mm/r に対応する各材料の体積比エネルギー平均値を比較することにより、削孔深さ (mm/r) の影響を除くことは可能である。その結果を Figure 3.15 に示す。

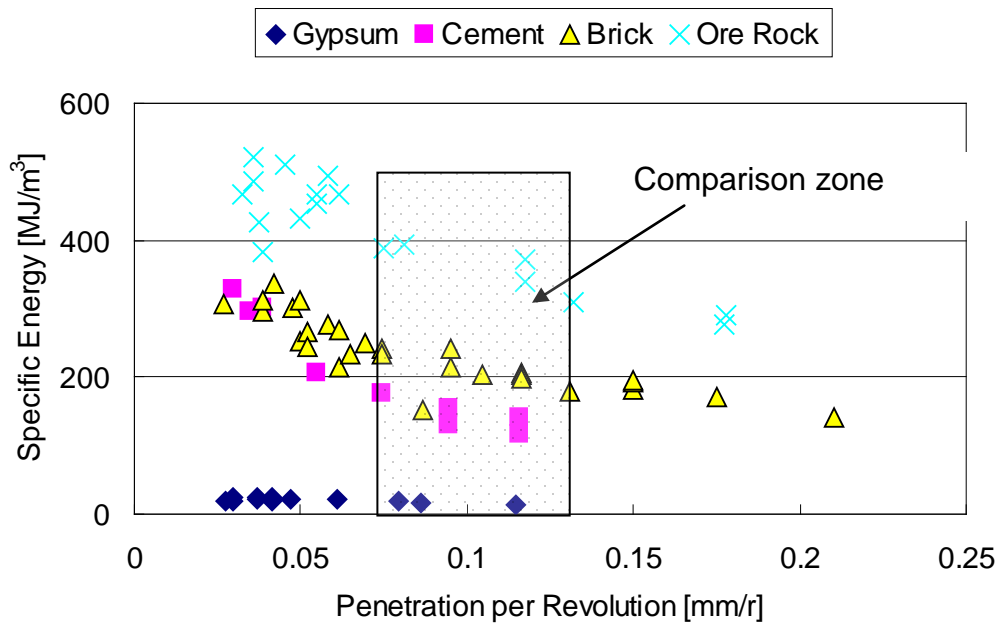


Figure 3.15: Effective specific energy (EES) VS Penetration per revolution.

方法 3) : 式(2.31)によって、切削に関わらないトルクを除き、有効体積比エネルギーを計算する手法がある。手順は下記の通りである。

Step 1: トルクと削孔深さ (mm/r) の回帰式を次式のようにまとめ、勾配と切片を計算する。計算結果は Table 3.2 に示す。

$$T = k_x \cdot d + T_x \quad (3.1)$$

ここでは、 k_x , T_x は定数である。

Step 2: 式(2.26)により、切片 T_x の成分は一軸圧縮強度と関連していないので、これらを除いて、有効トルクを得る。

Step 3: 石膏、セメント、レンガと鉱石に対して、それぞれの有効トルクを用い、式(2.31)によって、有効体積比エネルギーを計算する。Figure 3.16 には、有効体積比エネルギーと削孔深さ (mm/r) の関係を示している。有効体積比エネルギーが削孔深さ (mm/r) と独立であることが分かった。

Step 4: 事前にまとめた有効体積比エネルギーと一軸圧縮強度の関係式から、一軸圧縮強度を推定する。

実際に、Step 1 で単一の岩石に対する回帰分析は可能であるが、未知の岩種が複数ある場合に、回帰分析ができない。そのような場合には、経験によって、一定の切片 T_x を与え、有効トルクを求める。この方法は切削に関わらない成分をある程度に除去できる。

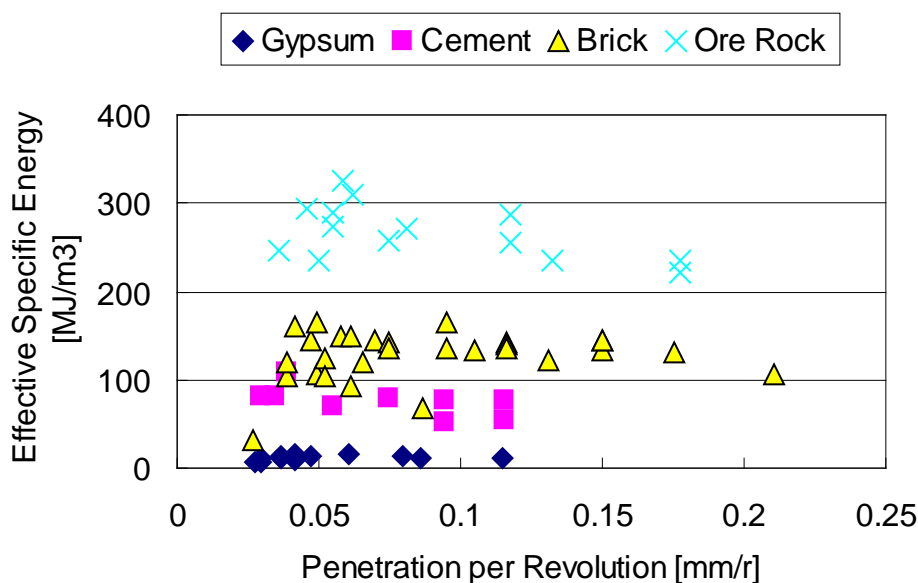


Figure 3.16: Effective specific energy.

以上、体積比エネルギーにより一軸圧縮強度を推定する3つの方法について述べた。方法 1) は計算が一番簡単であるが、不要な成分も含むため、一軸圧縮強度の推定精度は低い。方法 2) は、削孔深さ (mm/r) が体積比エネルギーに与える影響を軽減できるため、岩種の特

定に有効であるが、データ数が少ない場合に、誤差が大きくなる。方法 3)は、切削に関わらない成分を正確に除去することが容易ではないが、精度が高い。実際の削孔データから一軸圧縮強度を推定する場合は、データの特徴と要求推定精度に応じて方法を選ぶことになる。

3.4.5 境界面と亀裂の検出について^{3.1)}

1) 体積比エネルギー

式(2.32)を示すように、削孔体積比エネルギーは岩石の一軸圧縮強度に比例する。3.4.4の室内試験は式(2.32)を検証した。一般的に、岩種による一軸圧縮強度は異なり、削孔体積比エネルギーの変動は、岩種の変化を反映する。削孔体積比エネルギーの変動は一定の閾値を超える時、境界面に透過すると考えられる。また、亀裂を透過する時、切削力が瞬間に降下し、削孔体積比エネルギーも減少する可能性があると推測している。以下、削孔中に材料が変化する場合と不連続面(亀裂)が存在する場合について、同時に計測した削孔体積比エネルギーの変動状況について述べる。

室内削孔装置を用いて、材料が異なる供試体と内部に不連続面を有する供試体による削孔実験を行なった。材料が異なる供試体としては、モルタルブロックの上に石膏を流し込んだものを(厚さ約 73 mm)、不連続面を有する供試体としては、円柱コンクリート(直径約 150 mm)を圧裂引張試験で破壊したのを用いた。石膏・モルタルブロックは内径 10 mm のダイヤモンド・コアビット (Figure 3.17) を用い、コンクリート供試体は 5 mm, 10 mm, 20 mm のダイヤモンド・コアビットで削孔した。削孔中の各センサからの出力は、シグナルコンディショナを介してデータレコーダにサンプリング周波数 10 Hz で記録した。

削孔中に得られた各センサからの時系列出力は、N=5 の移動平均処理を施した後、ビット変位量に基づき分解能 1 mm のログデータ(削孔長に対する変動量)に変換した。

(石膏・モルタルブロックの境界面)

Figure 3.18 に、石膏・モルタルブロック供試体を削孔した際の体積比エネルギーの変化を示す。また、同図には回収したコアの写真も載せている。石膏削孔中の体積比エネルギーは低く、石膏とモルタルの境界に達すると一旦急激にエネルギーが高くなり、その後変動しながらもほぼ一定の値を示している。モルタル削孔中の変動は、モルタル中の空隙のためと考えられる。このように、機械量データから求めた体積比エネルギーによっても、材料の違いと境界面を判別する可能性がわかった。

(コンクリート供試体の亀裂)

直径 5mm, 10 mm と 20 mm の 3 種類のダイヤモンド・コアビットを用いて、コンクリート供試体内の亀裂を貫通する実験を行った。Figure 3.19 に、その際の削孔エネルギーの変化を示す。また、同図には、回収したコアの写真も示す。直径 5 mm と 10 mm の削孔エネルギー曲線により、ビット先端が亀裂面に達する直前からエネルギーが低下し始め、亀裂を通過して再び同レベルのエネルギーに至った。しかし、直径 20 mm のビットで削孔した曲線(青



Figure 3.17: Pregnant diamond bit (Asahi Diamond Industrial Co., Ltd.).

い線)では、エネルギーの変動範囲は小さく、亀裂箇所でも著しい変動が見られない。

一方、削孔体積比エネルギーの変動の原因は、境界面と亀裂だけに限らない。例えば、Figure 3.19 に示す亀裂がない領域①、②と③でも、エネルギーが低下している。その原因としては、コンクリートの内部組織の変化や、削孔機械量の変動 (Figure 3.8 に示すように、材料が同じでも、機械量の変動は削孔エネルギーの変化を引き起こす) などが考えられる。そのため、削孔体積比エネルギーの変動から直接境界面や亀裂位置を検出することはかなり難しい。

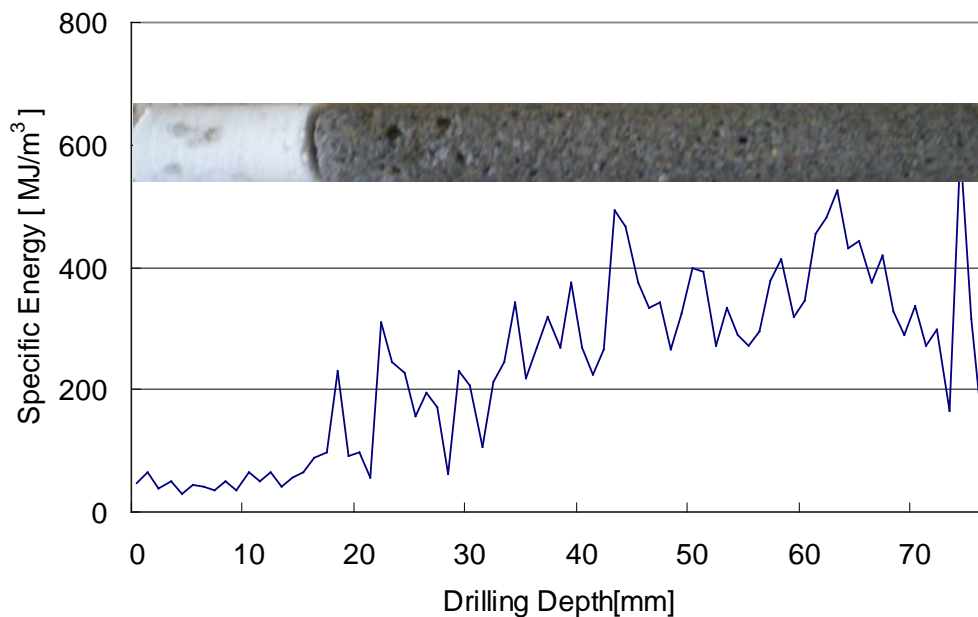


Figure 3.18: Specific energy & Specific power.

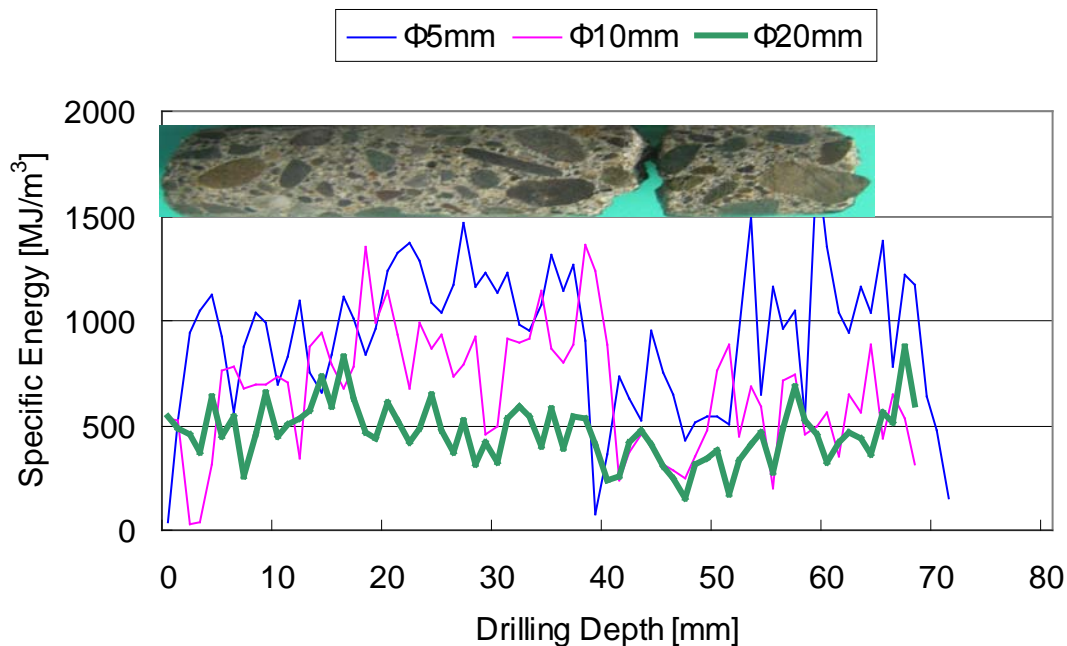


Figure 3.19: Specific energy and cracks.

2) トルク/推力

板倉ら^{3.2)3.3)3.4)3.5)}は、トルクと推力の比（トルク/推力）による亀裂や岩層境界面などの不連続面の位置検出手法を提案している。削孔径が同じであれば、トルク/推力は円周力/推力に相当し、ビットと岩石の間の「広義な摩擦係数」と考えることができる。従って、亀裂や境界面を通ると、トルク/推力も変動すると考えられる。本節では、上述のモルタルとコンクリートの削孔試験データを用いて、トルク/推力の有効性を検証した。

（石膏・モルタルブロックの境界面）

Figure 3.20 に、上述の石膏・モルタルブロック供試体を削孔した際のトルク/推力の変化を示す。石膏削孔中のトルク/推力は高く、石膏とモルタルの境界に達すると一旦急激に値が低くなり、その後変動しながらもほぼ一定の値を示している。モルタル削孔中の変動は、モルタル中の空隙のためと考えられる。このように、機械量データから求めたトルク/推力によっても、材料の違いと境界面を判別可能なことがわかった。

（コンクリート供試体の亀裂）

Figure 3.21 に、直径 5 mm、10 mm と 20 mm の 3 種類のダイヤモンド・コアビットでコンクリート供試体内の亀裂を貫通した際のトルク/推力の変化を示す。同図より、ビット先端が亀裂面に達する時、トルク/推力は急激に下降し、亀裂が終わった後、また急激に上昇する。

以上の試験結果から、トルク/推力および削孔体積比エネルギーは不連続面、すなわち岩層境界面や亀裂位置の検出に有効であることがわかった。第 5 章では、現場削孔試験データからトルク/推力により岩層境界面と亀裂位置を検出した結果について述べる。

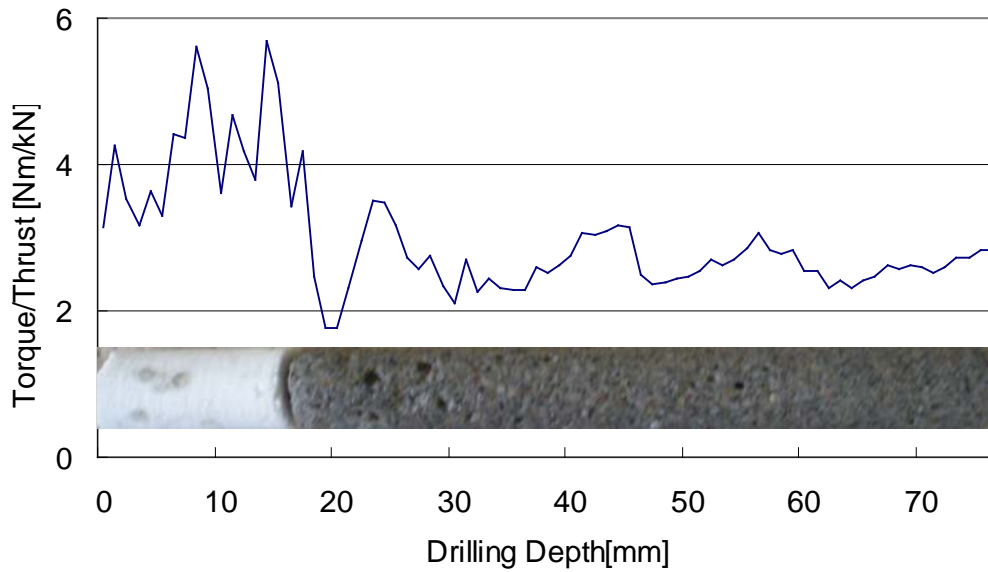


Figure 3.20: A boundary and Torque/Thrust (A bit of $\Phi 10$ mm).

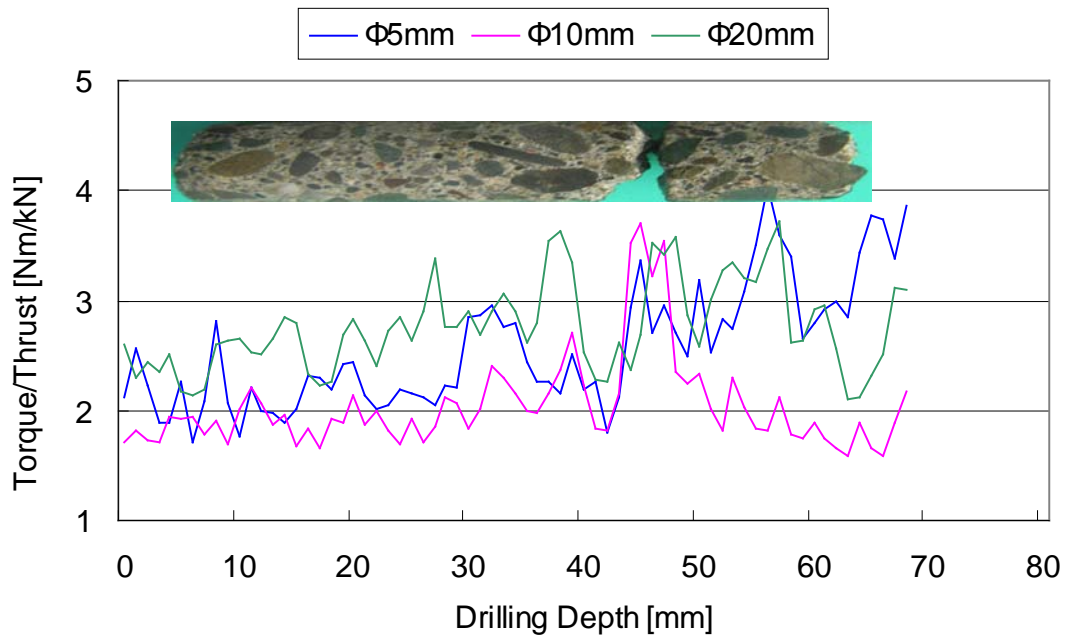


Figure 3.21: A crack and Torque/Thrust.

3.5 本章のまとめ

本章では、室内削孔実験装置（MWD 装置）を用いて削孔実験を行ない、第 2 章で提案した削孔分析モデルと理論式を検証した。結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 推力が上昇すると、トルクと1回転当たりの削孔深さも上昇する。一方、体積比エネルギーは低くなる。また、トルク/推力も変動する。
- 2) トルクは、材料の一軸圧縮強度に比例する。
- 3) 体積比エネルギーは、削孔材料の一軸圧縮強度に比例する。体積比エネルギーから一軸圧縮強度を推定することが可能である。
- 4) 削孔深さ (mm/r) が小さいほど、体積比エネルギーが大きい傾向が見られた。
- 5) 不要なトルクを除去した有効体積比エネルギーは、削孔深さ (mm/r) に独立している。
- 6) 体積比エネルギーから一軸圧縮強度を推定する、3つの方法を提案する。
 - ① 体積比エネルギーの平均値を用いて、直接的に一軸圧縮強度を推定する。しかし、無効成分も含まれるので、推定精度は低い。
 - ② 一定の削孔深さ (mm/r) に対応する体積比エネルギーを比較する。方法③より容易であり、岩種の特定に有効である。しかし、無効成分も含まれ、推定精度は低い。また、データ数が少ない場合に、推定が難しい。
 - ③ 無効なトルクを除き、有効体積比エネルギーを求める。無効なトルクを十分除くことが難しいが、推定精度は高い。
- 7) ダイヤモンドビットの削孔試験により、岩層境界面と亀裂位置の識別を試みた。体積比エネルギーとトルク/推力による方法を比較した結果、トルク/推力の方が識別しやすいことがわかった。

参考文献

- 3.1) 渡部秀一, 李占涛, 板倉賢一: 微小破壊検査によるコンクリート壁面内部の可視化について, 平成21年度開発技術研究会, pp. 24-25 (2009-12-9 室蘭市)
- 3.2) Itakura, K., Ichihara, Y., Deguchi, G., Matsumoto, H. and Eguchi, H., Estimation of the 3-D Geostrucution of Roof Rock in Mines using a Mechanical Data Logging System for Rock-Bolt Drilling, Proceeding of 4th International Symposium on Mining mechanization and Automation, Vol. 2, pp. 65-74, 1997.
- 3.3) 板倉賢一, 寺田浩海, 佐藤一彦, 市原 義久, 出口剛太: ロックボルト孔 MWD システムの開発, 施工管理と工程監視のための地下計測ワークショップ論文集, pp. 74-79, 1994年12月.
- 3.4) 板倉賢一, 佐藤一彦, 出口剛太, 市原義久, 松本裕之: さく孔の機械量データによる天盤構造可視化システムの開発, 資源・素材学会誌, 1999・13, pp. 1033-1039.
- 3.5) 板倉賢一ほか: ニューラルネットワークを用いた小口径ボーリングの機械量データ検層に関する研究 (06651089), 平成7年度科学研究費補助金 (一般研究 (C)) 研究成果報告書(1996.3)

第4章 天盤検層用削孔システムの開発

4.1 はじめに

第 1 章で述べたように、天盤崩落事故を防止し、安全な支保工を施工するためには、天盤構造と岩石物性値を知る必要がある。そのため、第 2 章では、削孔メカニズムをモデル化し、岩石の一軸圧縮強度とトルク、体積比エネルギーなどの機械量との関係について検討した。第 3 章では、室内試験を行ない、2 章で提案した関係式を検証し、機械量から一軸圧縮強度を推定できる見通しを示唆した。本章では、新たに開発した検層削孔機 Trussmaster Mark I と本質安全防爆化型 Mark II のハードウェアシステムとソフトウェアシステムについて述べる。次の第 5 章では、Trussmaster Mark I と Mark II を用いて、一軸圧縮強度の推定と不連続面位置の検出に関する実証試験の結果を報告する。

以下には、天盤検層用削孔システムの開発の概略について、以下の順に述べる。

- 1) 天盤検層用削孔システムのハードウェアシステムの構造と特徴
- 2) 各センサーとデータロガーの仕様
- 3) ソフトウェアシステム ITMS (Intelligent Trussmaster System) の流れ
- 4) ソフトウェアシステムの各機能

4.2 天盤検層用削孔システムのハードウェア

これまでに、板倉ら^{3.2) 3.3) 3.4)}は、下記のように 3 種類の天盤検層用削孔システムを開発した。

- 1) 油圧式削孔機用防爆型機械量データ検層システム^{3.2)}
- 2) 圧縮空気動作型削孔機 WOMBAT 用機械量データ検層システム^{3.3)}
- 3) 防爆型 WOMBAT 用機械量データ検層システム^{3.4)}

本研究では、以上の検層システムの技術を引き継ぎ、天盤検層用削孔システム Trussmaster Mark I と Mark II を開発した。Trussmaster Mark のハードウェアは、削孔機、センサー、データロガーで構成される (Figure 4.1)。

削孔機については、上述の 3 種類の天盤検層用削孔システムの開発では、Cram Australia Pty Ltd 社製圧気式ボルト打設機 Wombat, Hydromatic Engineering Pty Ltd 製油圧ボルト打設機 ARO Cable Bolter をベース機とした。システムの有効性は確認されたが、Wombat は耐久性に大きな問題があった。本研究では、堅牢で移動が容易な豪州 Rambor Ltd 社のボルト打設機 Trussmaster 1 P/N TRUSS001-1828 改良型 (95 シリーズモーター) をベース機として使用することとした。

最初は非防爆の市販データロガーで試験を行ない、一定の評価を得た。その際の削孔機を Trussmaster Mark I と呼ぶ。次に、データロガーを含め、ハードウェアの防爆化を図った。改良した削孔機を Trussmaster Mark II と呼ぶ。以下、主に Trussmaster Mark II の構成を紹介する。

この削孔機の空気圧回路を Figure 4.2 に示す。回転モータと推力モータを駆動する圧縮空気は独立的に供給されるので、トルクと推力は互いに干渉しない。Stinger を床面・天盤に利かせて本体を固定し、離れた場所から削孔作業が可能である (Figure 4.3)。また、ケーブルボルト打設にも対応している。削孔機の主な仕様を Table 4.1 に示す。

また、トルクや推力、ストロークと回転数を計測する各センサとデータロガーの仕様を Table 4.2 に示し、それぞれの外観を Figure 4.4-4.8 に示す。データロガーの構成図を Figure 4.9 に示す。4 つのセンサにより計測されたデータは、データロガーにより A/D 変換され USB メモリに保存される。このシステムでは、削孔距離に対応するデータを正確に取得するため、サンプリング間隔を 1 msec または 10 msec に設定できる。また、このシステムは、ロッドが回転していない時は削孔を行っていないとみなし、データロガーは自動的に一時停止する。この機能によって、メモリを節約し、バッテリーの消耗を防いでいる。USB メモリに保存したデータを坑外で PC に接続、転送して解析している。

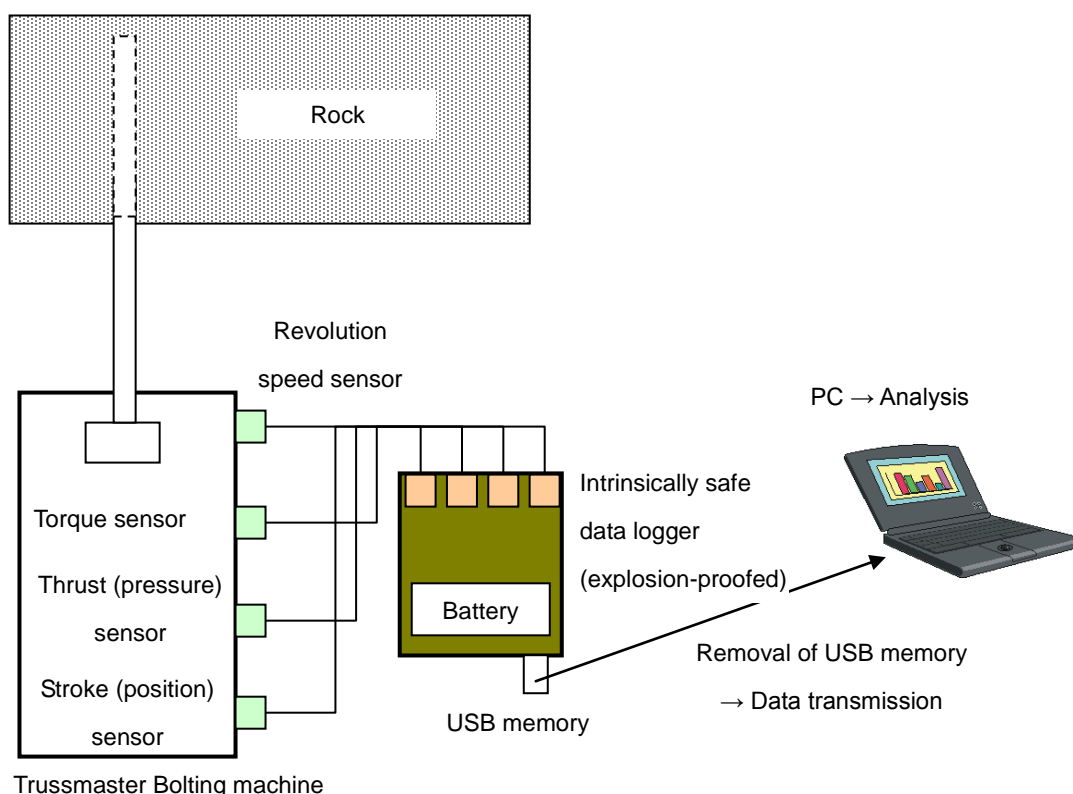


Figure 4.1: Configuration of roof logging system.

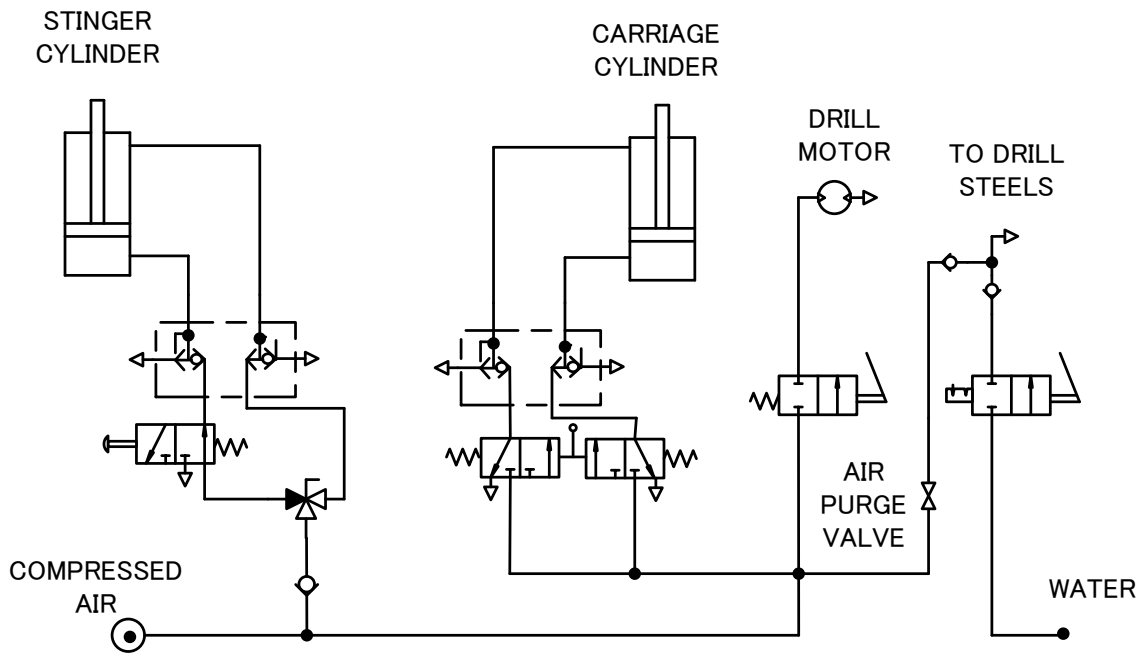


Figure 4.2: Trussmaster Schematic.



Figure 4.3: Bolting machine Trussmaster 1.

Table 4.1: Specifications of the drilling machine.

Item	Capacity	Unit
Revolution	850-900	RPM
Thrust	8.9	kN
Torque	251	Nm
Stroke	1.3	m
Air Consumption	2832-3398	l/min
Height	1.8-2.8	m
Air Pressure	689	kPa

Table 4.2: Specifications of sensors and data logger of the hardware system.

Mechanical Data	Model Number	Producer
Torque	Torque Cell A2100	Australian Weighing Equipment Pty Ltd
Pressure	Model 522	Setra Systems, Inc.
Stroke	HX-PA SERIES RATIO METRIC VOLTAGE OUTPUT	Uni Measure Inc.
Rotational speed	NJ2-12GM-N	Pepperl+Funchs Group
Data logger	Intrinsically Safe Data Logger	Ringway Control & Automation



Figure 4.4: Torque sensor.



Figure 4.5: Thrust sensor.



Figure 4.6: Stroke sensor.



Figure 4.7: Revolution speed sensor.

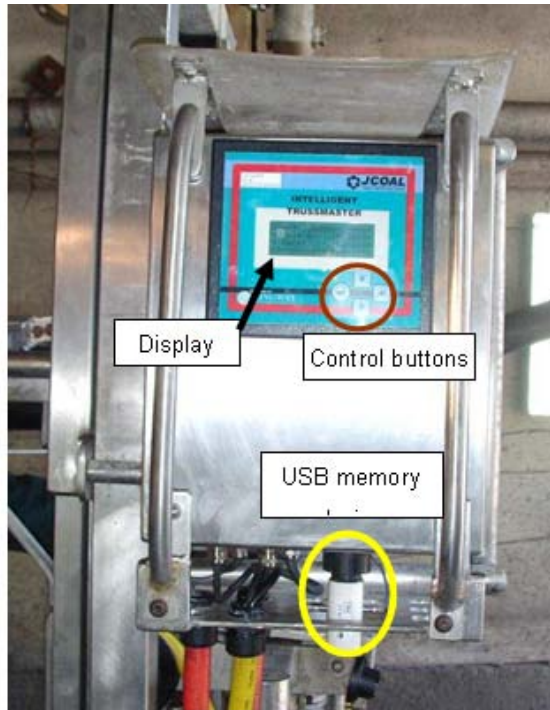


Figure 4.8: Intrinsically safe explosion-proof data logger.

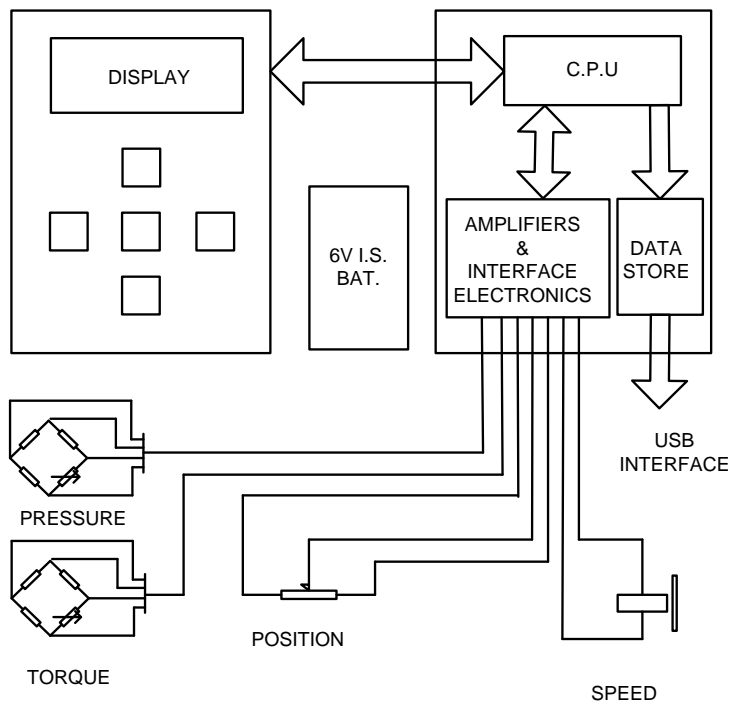


Figure 4.9: Block diagram of the intrinsically safe explosion-proof data logger.

4.3 天盤検層用削孔システムのソフトウェアシステム

収集したデータを解析し、岩石の一軸圧縮強度の推定と不連続面の位置を検出するために、ソフトウェア ITMS を開発した。解析は6つのステップからなり、その流れに沿ってデータが処理されていく。最終的に天盤の状況を可視化表示することが可能である。プログラムは Microsoft Windows 上で動作する。

ソフトウェアのフローチャートを Figure 4.10 に示す。ソフトウェアの起動時の画面を Figure 4.11 に示す。この画面において左側に6つのボタンが並んでいるが、これを上から順に実行していくと、Figure 4.10 の Step 1 から6までの処理が行なわれる。手順の詳細について、以下に述べる。

<Step 1 : データ形式の変換>

最初に行なうのは、バイナリーアスキー変換である。メモリ節約のため、計測データはバイナリ形式 (xxxx.ITS) でデータロガーに保存される。このバイナリファイルをアスキー形式に変換する必要がある。変換されたデータはアスキーファイル (xxxx.csv) として保存される。Figure 4.12 は、変換後のアスキーファイルの一例である。ファイルはヘッダ部分の後、計測データとして左からサンプル番号、トルク、ストローク、推力、回転数の順番で記録される。サンプリング毎に、サンプル番号が増加する。従って、サンプル番号から削孔時間を算出できる (この行数の差にサンプリング間隔を乗じればよい)。各機械量の経時変化の代表例を Figure 4.13 に示す。

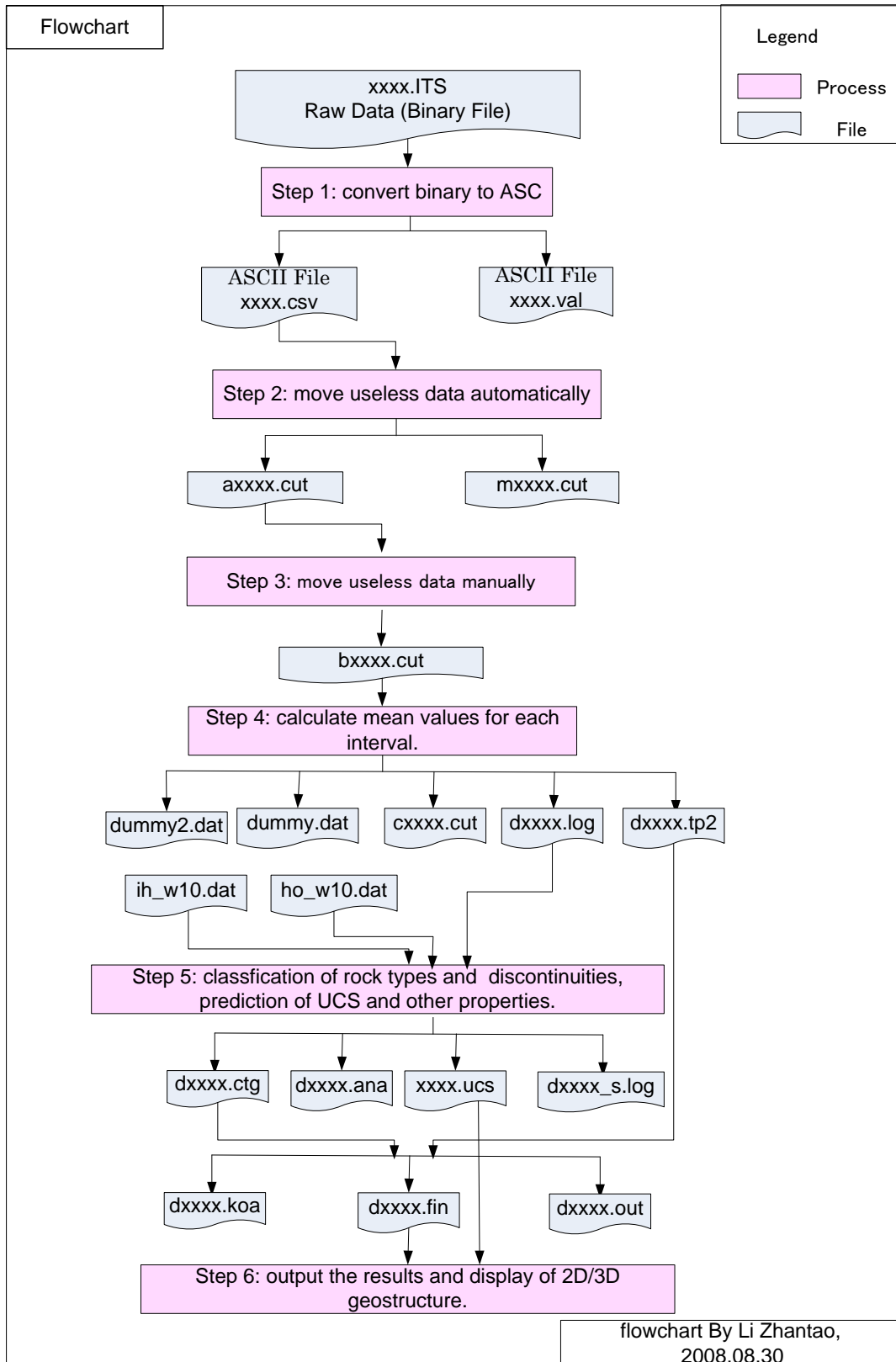


Figure 4.10: Flow chart of ITMS.

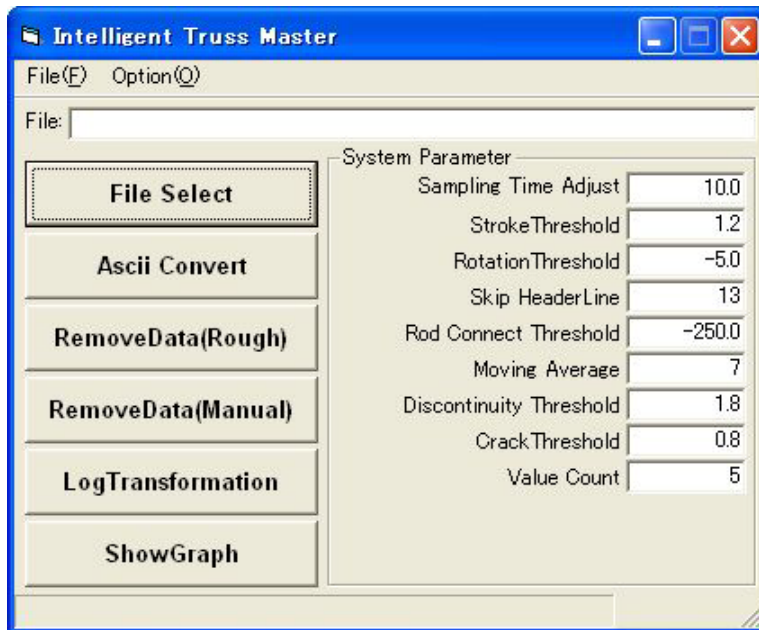


Figure 4.11: Startup screen of the analytical software.

CH	Signal Name	Min Value	Max Value	Engineering Unit	Min Eng	Max Eng
13	Sample Number	Torque Value	Stroke Value	Pressure Value	Speed Value	
14	3120	0	233	540.4	0	
15	3121	0	233	540.4	0	
16	3122	0	233	539.7	0	
17	3123	0	234	539.9	0	
18	3124	0	234	539.4	0	
19	3125	0	234	538.7	0	
20	3126	0	234	537.7	0	
21	3127	0	235	537.2	0	
22	3128	0	236	537.5	0	
23	3129	0	236	536.5	0	
24	3130	0	236	537.5	0	
25	3131	0	236	537.7	0	
26	3132	0	236	537.7	0	

Figure 4.12: ASCII-converted .csv file.

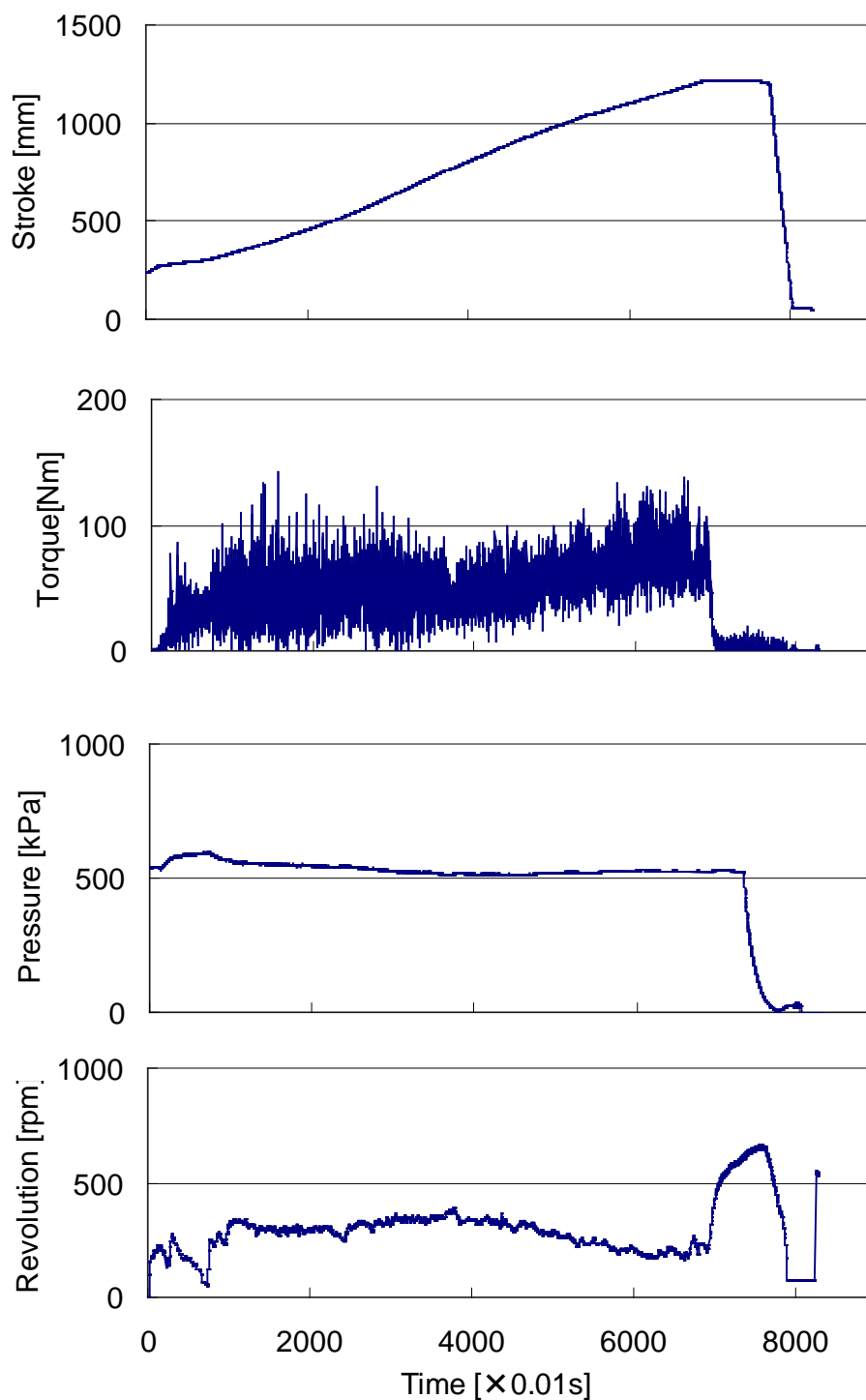


Figure 4.13: Typical time series mechanical data.

<Step 2 : 削孔中以外のデータの自動削除>

Step 1 で作成された csv ファイルは計測結果の時系列データであり、ロッド交換時や削孔後にロッドを下げる時のデータは解析には不要である。よってこれらの不要データを削除

する必要がある。また、必要に応じてデータの間引きも行なう。この作業は自動的に行なわれる。出力ファイルは `axxxx.cut` である。

<Step3 : 削孔中以外のデータの手動による削除>

削孔停止時間のデータを Step 2 で自動的に削除できない場合がある時、手動より削除する。Figure 4.14 は、手動より削除を行なう場合のプログラムの例である。各機械量データの時系列のグラフを見ながら、不要な部分を選択し、削除する。削除した後、その前後を結合することができる。出力ファイルは `bxxxx.cut` である。

以上で時系列のデータ加工は終了である。

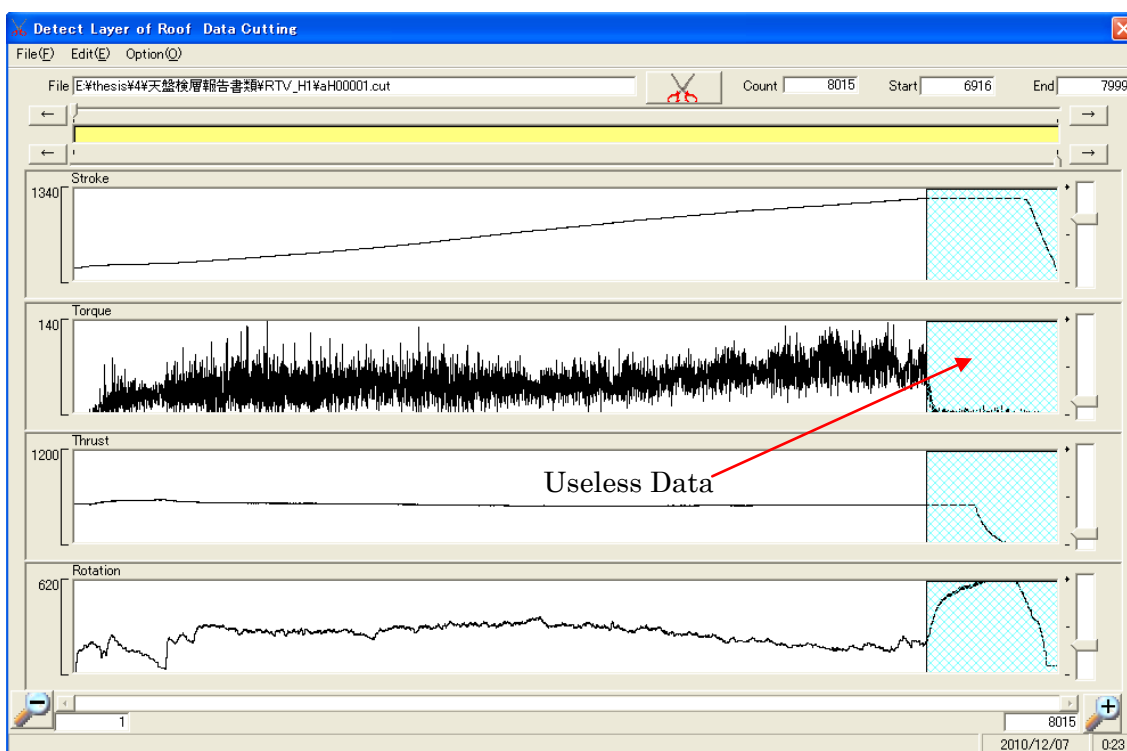


Figure 4.14: Screen displayed by program during data removal manually.

<Step 4 : 時系列データから削孔長に対するログデータへの変換及び平均化>

ストロークの計測値を用いて、時系列データから削孔長に対するデータ変換を行なう。ここで必要に応じてデータの移動平均処理も実施する。移動平均により、高周波雑音を除去することができる。

また、この step では、基本的な機械量であるトルクや推力、ストロークと回転数を用いて、組み合わせパラメータ（例えば、トルク/推力と体積比エネルギー）を計算する。

さらに、一定間隔毎に各機械量の平均値を計算する。本研究では、10 mm 毎の機械量の平均値を求めた。結果は `cxxxx.cut` に出力する。Figure 4.15 は、10 mm 毎の各機械量ログデータの一例である。これより、距離に対応した基本的な機械量データと組み合わせパラメ

ータを求めることができた。また、一定間隔毎に各機械量の移動平均処理を行ない、`dxxxx.tp2` に出力した。トルク/推力の移動平均値は、`dxxxx.log` に出力した。

<Step 5 : データの解釈>

このステップでは、機械量データを用いて岩盤構造や、岩石物性値、岩石種類、不連続面（亀裂、節理、界面）の位置を推定する。2章で述べたモデルと計算式(2.26)と(2.32)を基づき、一軸圧縮強度を推定する。岩石の一軸圧縮強度の推定は、第5章に詳しく説明する。不連続面位置の抽出方法は、次のようになる。

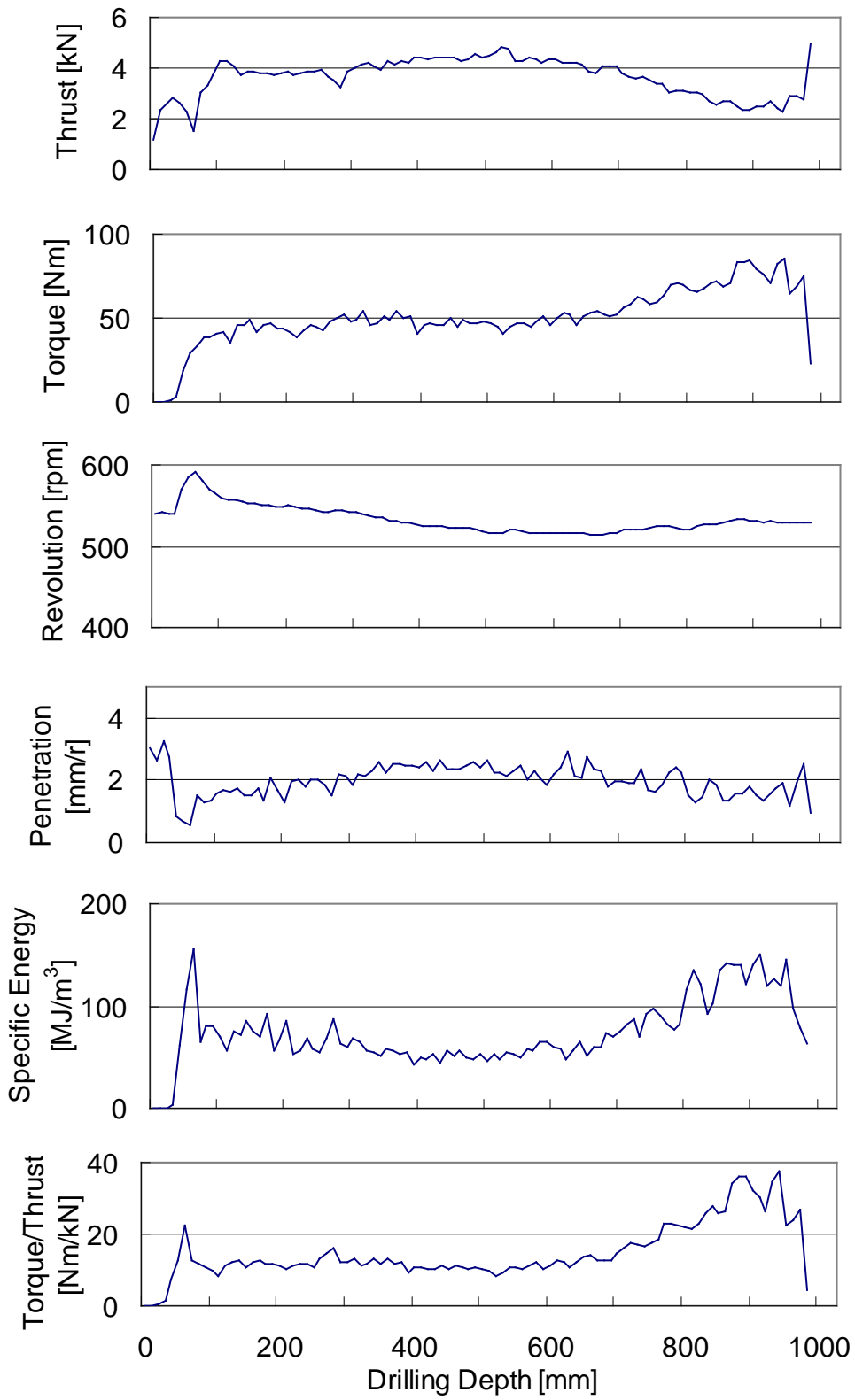


Figure 4.15: Typical mechanical data log.

不連続面位置の抽出には、トルク/推力を用いた。まずトルク/推力のログデータを 10 データ毎に分割し、それぞれがどのパターンに属するかを、ニューラルネットワーク（付録 2 参照）で自動的に判断する。これにより、トルク/推力のログデータは 0 から 8 の 9 パターン（Figure 4.16）に分類される。変動傾向を 9 パターンに分けた後、以下のルールにより不連続面かどうかの判別を行なう。

No.0 に分類された点は、不連続面としない。

No.1, No.2, No.3, No.4 のどちらかが連続する面は地層境界とする。

No.5, No.6, No.7, No.8 がいくつかの場合、微小亀裂とする。

No.7, No.8 のどちらかに分類され、その点の前に No.3, No.4 が連続し、その点の後に No.1, No.2 が連続したら、その点を亀裂とする。

このようなパターン列を用いて、亀裂や不連続面箇所の検出を行なう。トルクと推力の比については、dxxxx.log を利用する。ファイル ih_w10.dat と ho_w10.dat は、事前に用意した教師データによるニューラルネットワークの学習後の荷重データである。各地層のパターン分類の結果を dxxxx.ctg と dxxxx.ana として出力する。不連続面の位置を dxxxx.fin に出力する。また、一軸圧縮強度の推定結果を xxxx.ucs に出力する。

< Step 6 : 結果の出力と表示 >

機械量データを用いて推定した地層構造、すなわち岩石物性値、岩石種類、不連続面（亀裂、節理、界面）位置などの結果（不連続面と岩層の結果：dxxxx.fin；一軸圧縮強度の結果：xxxx.ucs）は、Figure 4.17 に示すようにグラフ表示により確認することができる。同図では、黄色の丸印は不連続面の位置を代表し、青い線はトルク/推力のログデータであり、ピンクの線は岩層の変化を表す。推定された不連続面位置（黄色の丸印）において、岩相境界線（ピンクの線）が変化していれば岩相境界であり、変化していなければ亀裂と判断される。

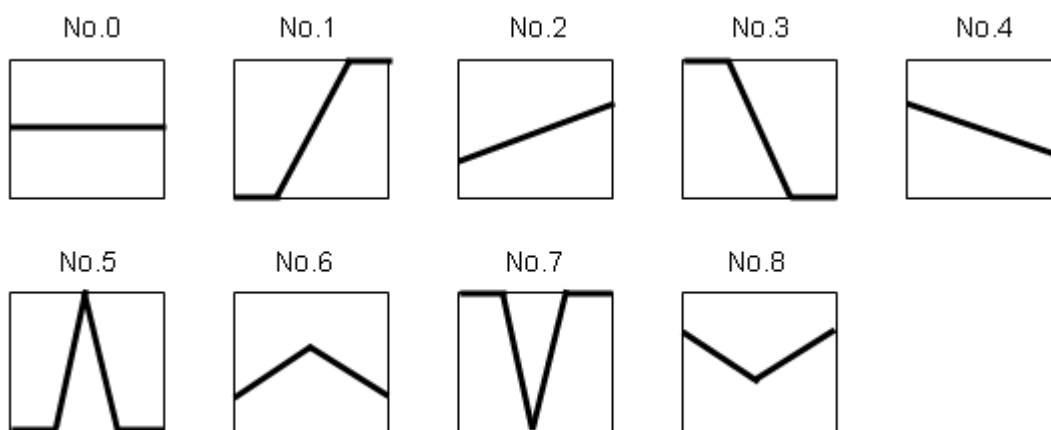


Figure 4.16: Patterns of geological structure.

本研究では、VRML (Virtual Reality Modeling Language) を用いて、推定した地層構造を3次元で表示するシステムを開発した。Figure 4.18 は、地層構造を表した例である。同図では、赤色の小球は削孔位置の亀裂を表し、曲面は地層境界である。

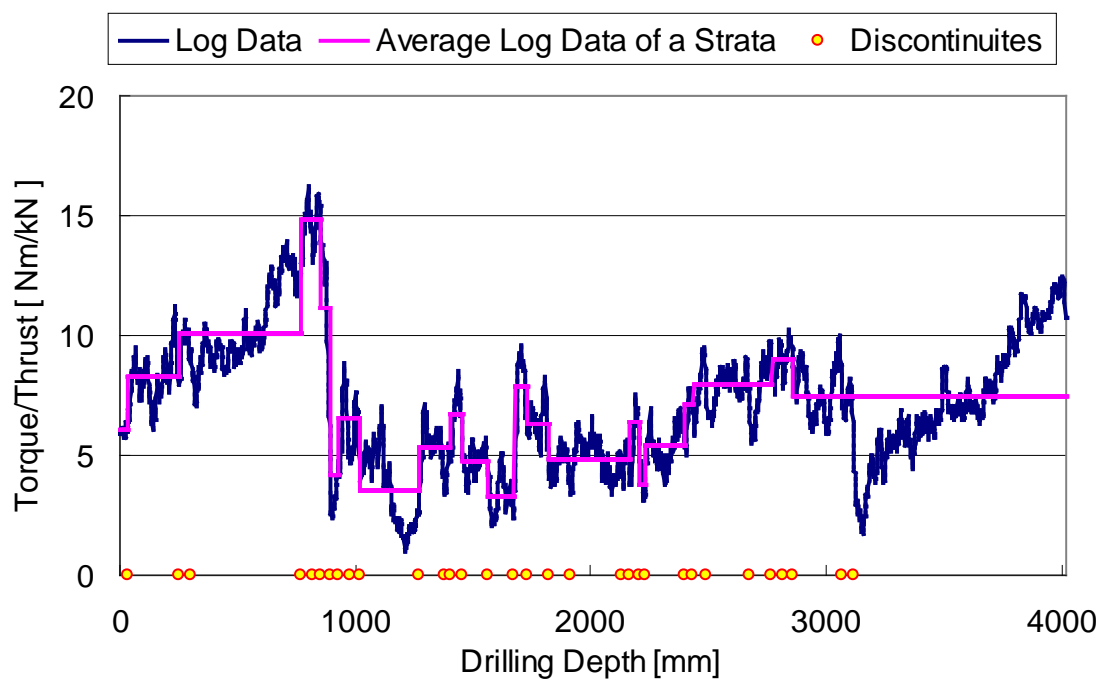


Figure 4.17: Example of sampled discontinuities.

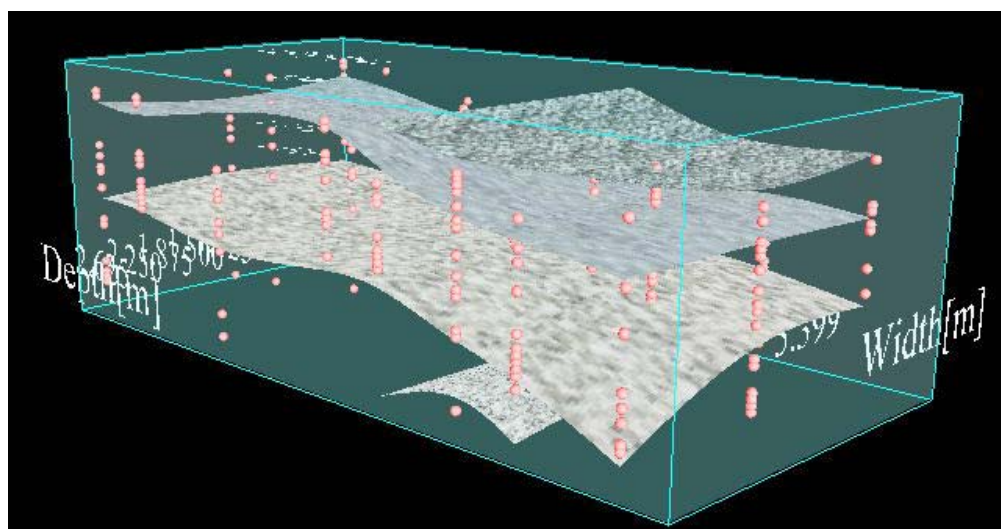


Figure 4.18: Example of VRML display of the analytical results.

4.4 本章のまとめ

本章では、新たに開発した天盤検層削孔システムのハードウェアシステムとソフトウェアシステムについて述べた。

本天盤検層削孔システムのハードウェアシステムは、削孔機、センサ、データロガーで構成される。センサは推力、トルク、ストローク、回転数の4つの基本的な機械量を計測し、データロガーで記録する。ハードウェアシステムの特徴は、以下のようになる。

- 1) データロガーを含め、ハードウェアの防爆化を図った。
- 2) ベースにした削孔機は圧気式であり、比較的軽量で移動が容易である。
- 3) 回転モータと推力モータを駆動する圧縮空気は独立的に供給される。従って、トルクと推力を独立的に設定できる。
- 4) **Stinger** を床面・天盤に固定し、遠隔で削孔作業が可能のため、削孔作業が安全に行なえる。

ソフトウェア **ITMS** による信号処理手順は、以下の通りである。

- 1) バイナリデータをアスキーデータに変換。
- 2) 削孔中以外のデータを除去。
- 3) 時系列データをログデータに変換。
- 4) 岩石の一軸圧縮強度の推定。
- 5) ニューラルネットワーク手法による不連続面の検出。
- 6) 推定した天盤構造の可視化。

これにより、岩石の一軸圧縮強度の推定や、不連続面の位置と岩層の変化を検出することが可能になった。

第5章 現場適用試験

5.1 はじめに

本章では、第 2 章で提案した削孔分析モデルと計算式、及び第 3 章で述べた室内試験の結果に基づき、第 4 章で述べた天盤検層削孔システムを用いて、工場試験と炭鉱における削孔試験の結果についてまとめる。特に、坑道天盤を構成する岩石の一軸圧縮強度の推定及び不連続面位置の検出結果について述べる。現場適用試験の概要を以下に示す。

- 1) Trussmaster Mark II による工場試験；
- 2) 釧路コールマインにおいて Trussmaster Mark I の現場適用試験；
- 3) 豪州 NSW 州 Wollongong 近郊の Gujarat NRE No.1 炭鉱（以下 NRE 炭鉱と呼ぶ）Adit 20 における実施した Trussmaster Mark II の現場試験；
- 4) 同炭鉱の RTV（Rubber Tire Vehicle）坑道における Mark II の現場試験。

工場試験と現場試験では、Trussmaster Mark I と Mark II を利用した。Trussmaster Mark I 機はデータロガーが非防爆であるが、取得できるデータは基本的に Trussmaster Mark II と同等であるので、検層システムの検証用のデータの蓄積のために使用した。

5.2 Trussmaster Mark II の工場試験

5.2.1 試験概要

検層システムによる不連続面の検出と天盤構造の可視化のために、Trussmaster Mark II を用いた工場試験を行なった。場所は豪州 Rambor Ltd 社の工場である。坑道天盤の代わりとしてコンクリートブロックを 3 種類用意し、削孔中のデータ収集を記録した。コンクリートブロックの構造を Figure 5.1 に示す。各コンクリートブロックは強度の異なる 2 種類（Hard, Soft）のコンクリートから構成されている。Hard 及び Soft 部分の物性を Table 5.1 に示す。ハード部分は 1 cm–2 cm の骨材を含んでいる。

ビットは直径 27 mm (Figure 5.2)、直径 55 mm (Figure 5.3) の 2 種類を用いた。ロッドは、27 mm ビットによる削孔の時は 22 mm 六角ロッド、55 mm ビットによる削孔のときは AW ロッドを用いた。ビット、ロッドの接続にはアダプタを使用した。

Figure 5.4 は削孔位置分布のパターンを示す。同図には、大きい数字は $\phi 55$ mm の削孔位置、小さい数字は $\phi 27$ mm の削孔位置を示している。Trussmaster Mark II 本来は上方向に削孔する機械であるが、今回はブロックを貫通させるために横置きにして削孔した。

ロッドの継ぎ足し・交換方法について、 $\phi 27$ mm 削孔の場合を Figure 5.5 に、 $\phi 55$ mm 削孔の場合を Figure 5.6 に示す。すべての場合で、コンクリートブロックは 3 回目のロッ

ド交換で貫通させた。

各ブロックにおける試験条件を Table 5.2 に示す。また、試験時の様子を Figure 5.7 に示す。削孔後のコンクリートブロックの様子を Figure 5.8 に示す。

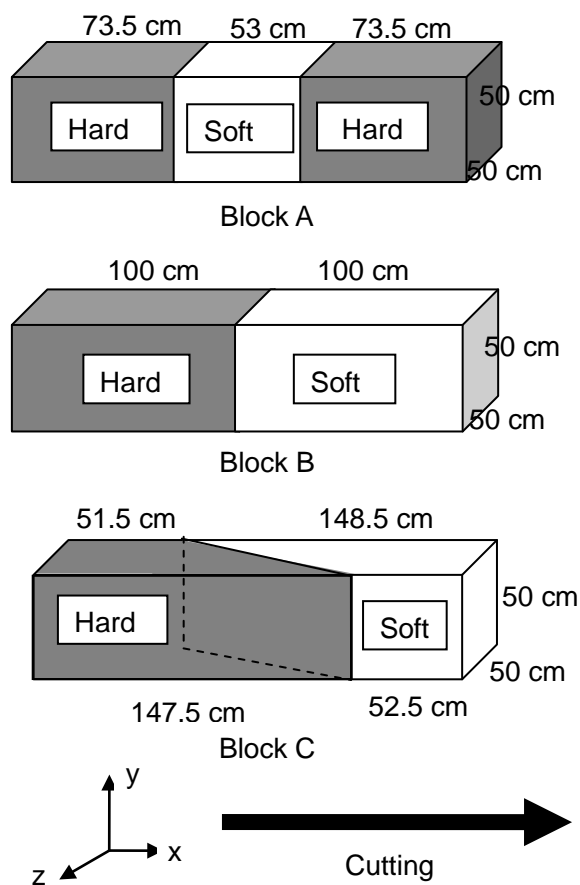


Figure 5.1: The concrete blocks.

Table 5.1: The physical properties of the concrete blocks.

Item	Hard	Soft
Uniaxial Compressive Strength	28.3 MPa	7.6 MPa
Tensile Strength	2.9 MPa	1.2 MPa
Density	2,256.7 kg/m ³	2,000 kg/m ³



Figure 5.2: Bits used in this experiment ($\Phi 27$ mm, Left: Spade; Right Two Wing).

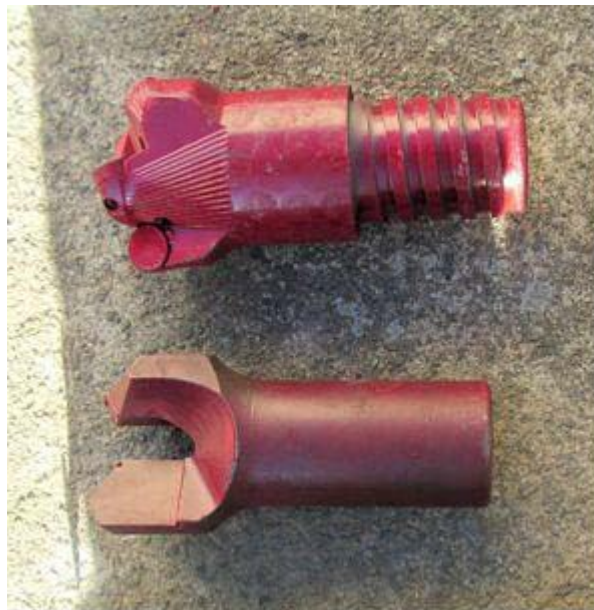


Figure 5.3: Bits used in this experiment ($\Phi 55$ mm, Top: PCD; Bottom: Tungsten Two Wing).

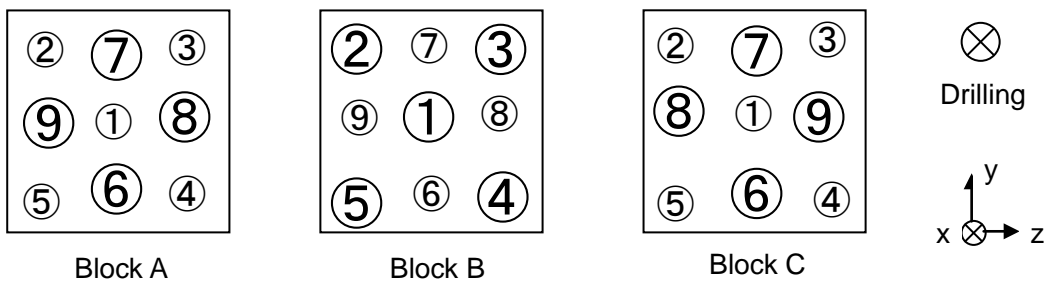


Figure 5.4: Layout of the hole locations (Big circles are $\Phi 55$ mm, small circles are $\Phi 27$ mm).

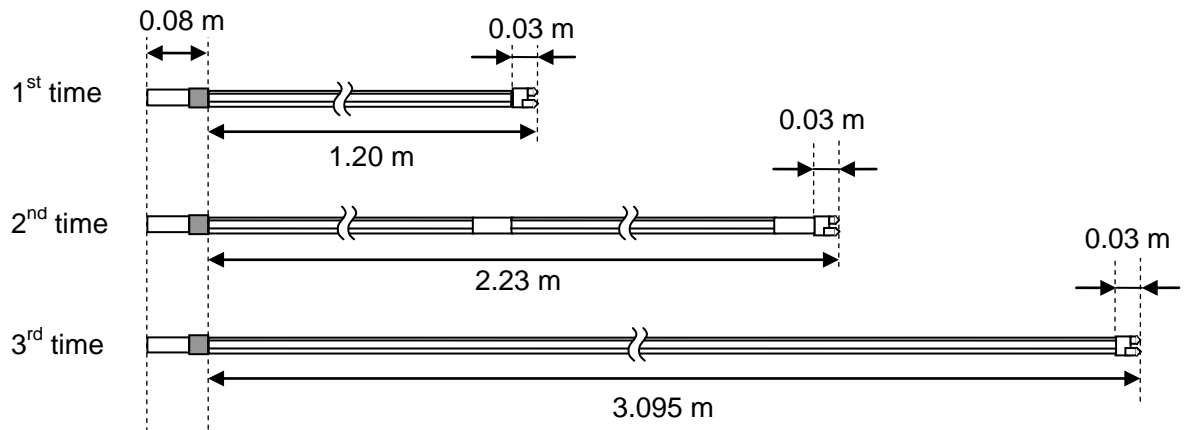


Figure 5.5: Exchange of rods while drilling for those $\Phi 27$ mm holes.

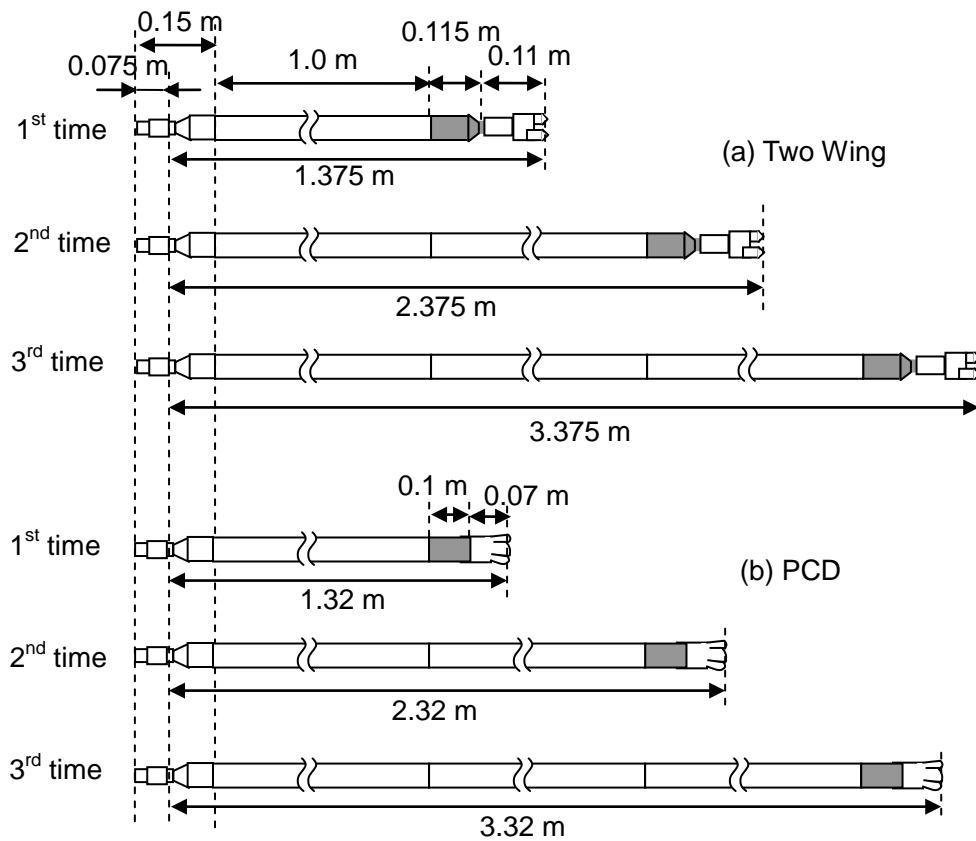


Figure 5.6: Exchange of rods while drilling for those $\Phi 55$ mm holes.

Table 5.2 Experiment conditions.

Block A: 9 Holes						
No.	Start: z	Start: y	End: z	End: y	Φ [mm]	Bit Type
①	25.9	27.7	24.7	24.1	27	Spade
②	8.9	40.6	2.5	38.2	27	Spade
③	40.9	39.4	42.7	31.6	27	Spade
④	41.3	13.5	41.7	6.6	27	Two Wing
⑤	10.2	11.8	1.2	5.6	27	Two Wing
⑥	21.0	14.0	21.0	11.4	55	Two Wing
⑦	24.5	39.5	23.0	37.1	55	Two Wing
⑧	38.6	26.6	44.1	24.4	55	Two Wing
⑨	14.2	28.2	13.9	26.7	55	Two Wing
Block B: 9 Holes						
No.	Start: z	Start: y	End: z	End: y	Φ [mm]	Bit Type
①	23.6	28.7	24.3	32.5	55	Two Wing
②	8.1	38.4	4.5	40.3	55	Two Wing
③	41.6	37.4	48.8	39.5	55	Two Wing
④	37.9	14.7	36.5	18.5	55	Two Wing
⑤	8.6	13.4	10.0	14.3	55	Two Wing
⑥	23.4	14.5	19.9	14.0	27	Two Wing
⑦	28.8	37.8	Hit with ①		27	Two Wing
⑧	34.4	26.4	28.2	27.4	27	Two Wing
⑨	12.3	26.0	6.1	25.1	27	Two Wing
Block C: 10 Holes						
No.	Start: z	Start: y	End: z	End: y	Φ [mm]	Bit Type
①	28.8	27.4	24.1	23.3	27	Two Wing
②	15.5	36.7	9.1	30.9	27	Two Wing
③	37.1	36.8	37.1	33.4	27	Two Wing
④	39.5	12.4	38.8	3.5	27	Two Wing
⑤	8.7	12.4	6.5	3.3	27	Two Wing
⑥	32.2	9.8	Hit with ④		55	PCD
⑥	25.1	16.7	24.8	14.7	55	PCD
⑦	23.9	40.3	15.3	41.5	55	PCD
⑧	17.4	24.8	12.3	18.8	55	PCD
⑨	40.3	25.7	43.8	23.2	55	PCD

※ Sampling Interval: 10 msec

※ Unit: cm



Figure 5.7: Scene of the experiment.



Figure 5.8: Concrete block A after the experiment.

5.2.2 不連続面位置の検出

板倉ら^{3.2) 3.3) 3.4) 3.5)}は、トルク/推力により亀裂や岩層境界面などの不連続面位置の検出手法を提案している。3章では、室内試験によりこの手法の有効性を検証した。上述の手法により、工場試験のデータを分析して、不連続面位置の抽出を試みた。代表例として、ブロックB③のデータのうち、不要データ削除後の時系列グラフをFigure 5.9、ログ変換したグラフをFigure 5.10、不連続面位置の結果をFigure 5.11に示す。Figure 5.11において黒い

●で示した箇所が不連続位置と判定された。さらに、不連続面の前後のトルク/推力を比較し、一定の閾値を超える箇所を異なる材料間の境界面と判定し、それ以外を亀裂や骨材とセメントの境界面と判定した。Figure 5.9-5.11 によると、中央部以外ではトルク/推力値が細かく振動しているのがわかる。これは、硬質コンクリート部分 (Hard) に 1 cm-2 cm の骨材が含まれているためである。Figure 5.1 に示すコンクリートブロックの設計図と対照した結果、不連続面の位置を正確に検出できていることがわかる。

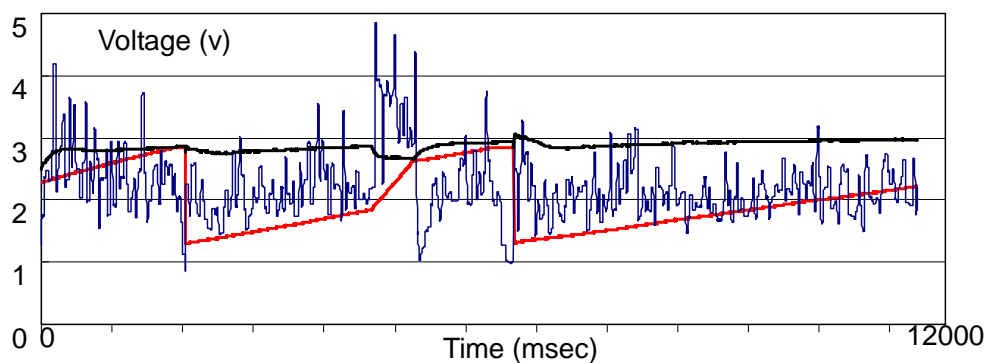


Figure5.9: Time serial data (Torque/Thrust) after deletion of useless data.

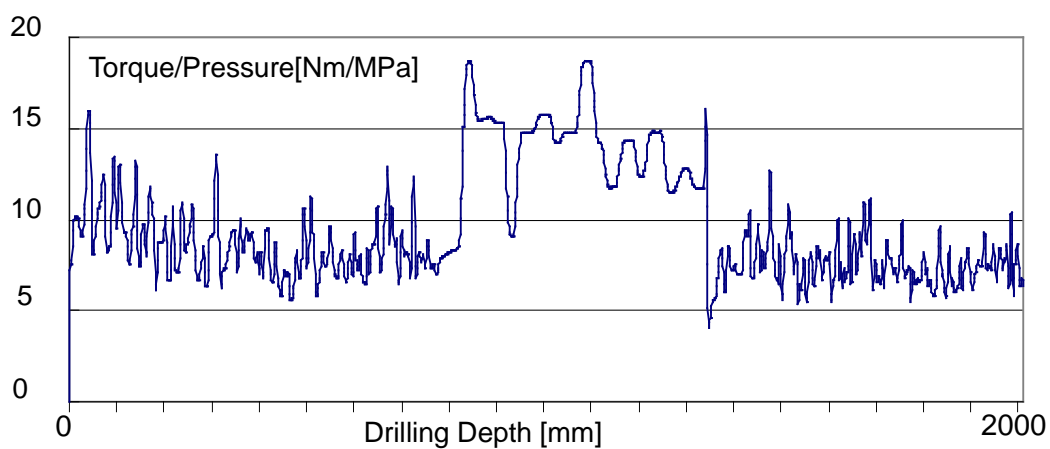


Figure5.10: Depth serial data (Torque/Thrust).

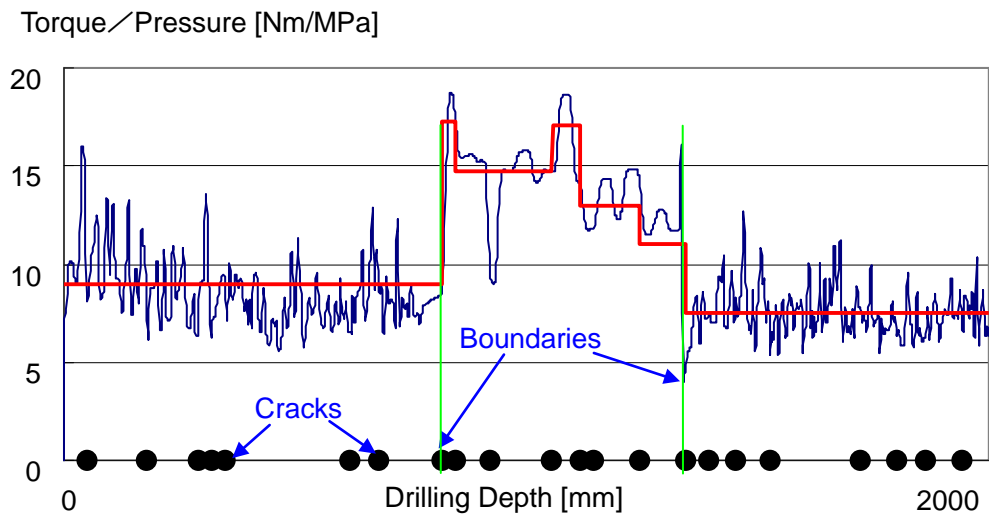


Figure5.11: Discontinuities recognized by using Torque/Thrust.

5.2.3 地層構造の可視化

不連続面の位置を検出した後、全てのデータが VRML 形式に変換され、Web ブラウザで解析結果が表示される。Figure 5.12 は工場試験の機械量から推定した不連続面位置の検出結果を示す。同図において、赤丸は骨材とセメントの境界面、灰色の面は性質が異なるコンクリートの境界面を表す。このように、Figure 5.1 に示すコンクリートブロックの構造を 3 次元的に表示することができた。

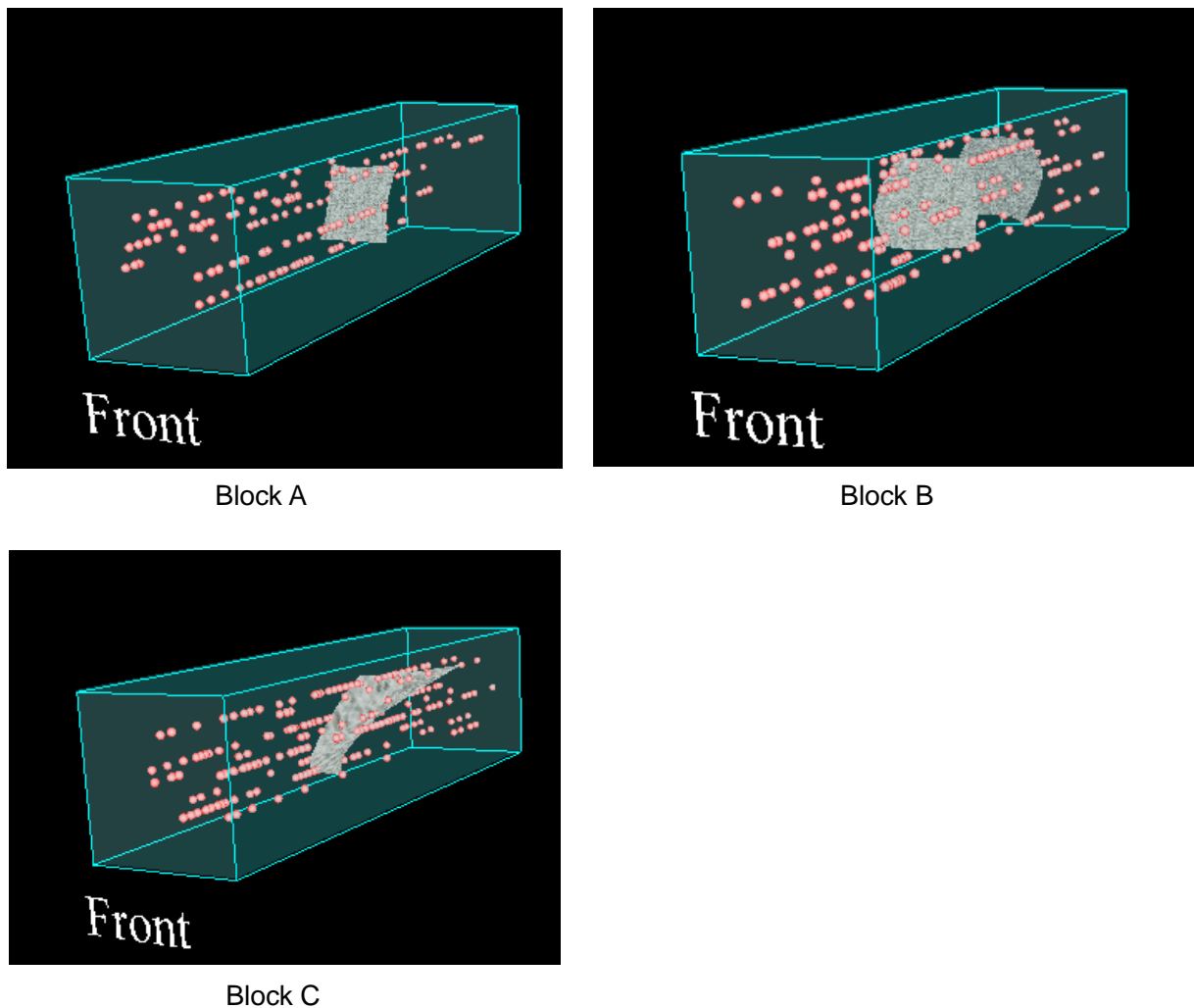


Figure 5.12: 3D display of discontinuities (Factory tests).

5.3 釧路コールマインにおける Trussmaster Mark I の現場試験

検層システムを用いて、トルク/推力により亀裂や境界面、節理などの不連続面位置の検出手法を炭鉱現場に適用するために、釧路コールマインにおいて Trussmaster Mark I 機を用いた現場適用試験を行なった。

5.3.1 試験概要

試験現場は釧路コールマインの上部中央 2 号 SD 風坑である (Figure 5.13, Figure 5.14)。天盤壁面から 3~4 m には砂岩があり、2 m 前後の位置には、粘土を含む石炭層があった。この坑道において、Figure 5.14 に示すように $\phi 27$ mm のビットを用いて 24 孔、 $\phi 55$ mm のコアを 2 孔削孔した。ビットは Two-wing 型を使用している (Figure 5.15)。推力、トルク、回転数、ストロークの 4 パラメータを、サンプリング間隔 1 msec で計測、記録した。また、

可能な限り、一定の推力で削孔するようオペレータを指示した。試験中の様子を Figure 5.16 に示す。

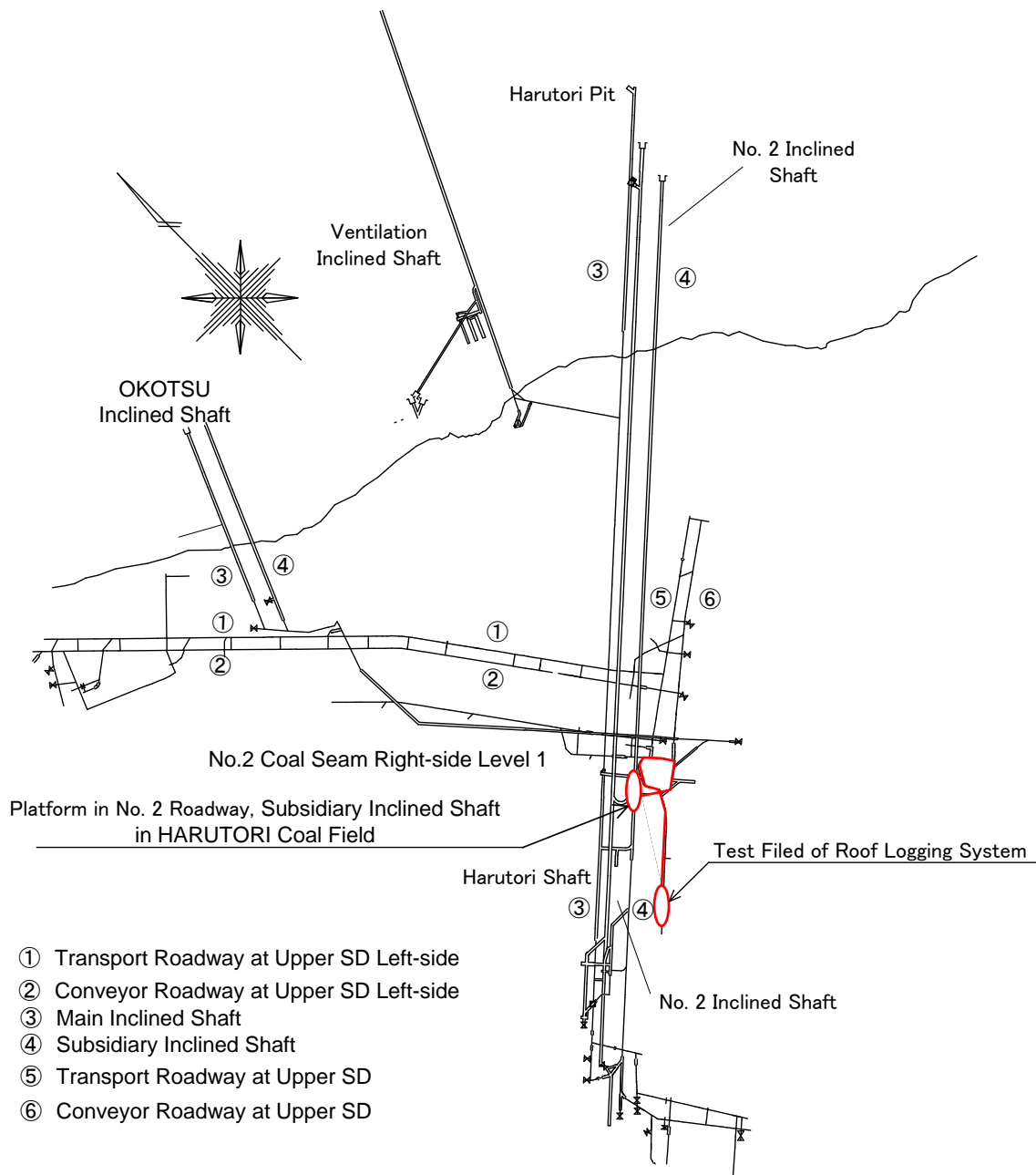





Figure 5.13: Field plan of KUSHIRO Coal Mine.

Framework Type C-58 (Interval 0.8 m) Section
 Area 14.9 m²

Unit : m

Legend

	Core (Φ55 mm)
	Non Core (Φ27 mm)
	Tell-Tale

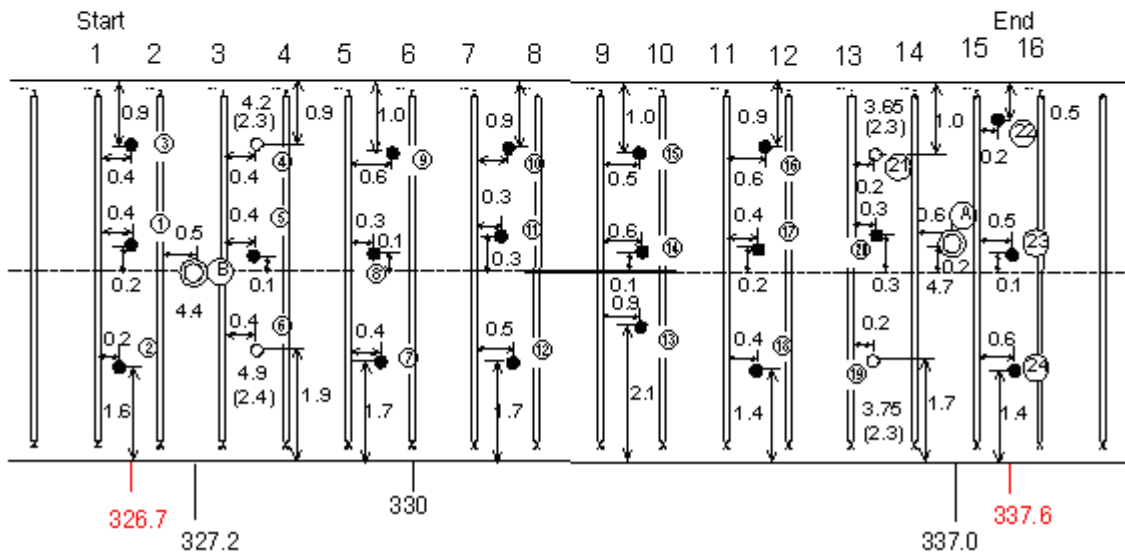
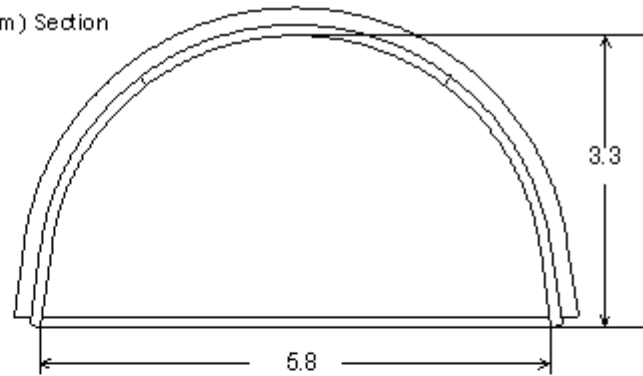


Figure 5.14: Layout of the hole locations at No. 2 SD Air Pit (KUSHIRO Coal Mine).

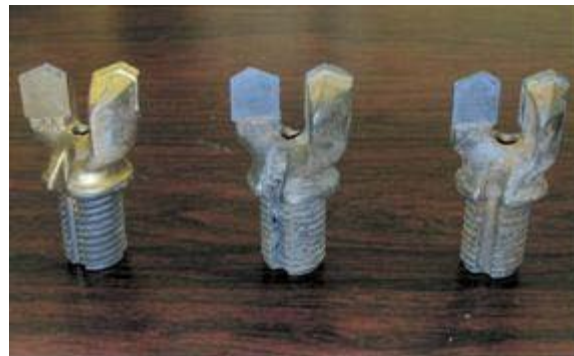


Figure 5.15: Bits used in the experiment (KUSHIRO Coal Mine).



Figure 5.16: Scene of the experiment (KUSHIRO Coal Mine).

また、地質状態を確認するために、コアを 2 本削孔した。コア A、B の写真を Figure 5.17 と Figure 5.18 に、柱状図を Figure 5.19 と Figure 5.20 に示す。削孔長は、いずれの孔も約 5 m である。この領域内に石炭層が 2 層見られ、コアや RQD 値からも軟弱な領域が存在することが分かった。



Figure 5.17: Core A (KUSHIRO Coal Mine).



Figure 5.18: Core B (KUSHIRO Coal Mine).

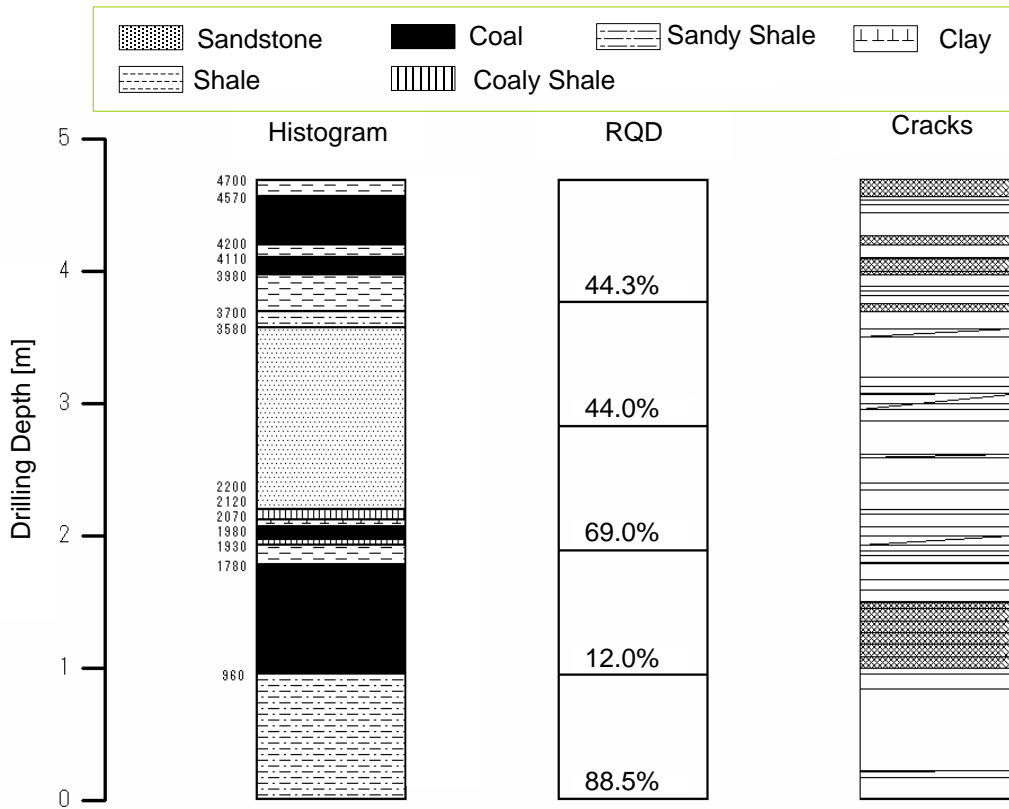


Figure 5.19: Histogram of Core A (KUSHIRO Coal Mine).

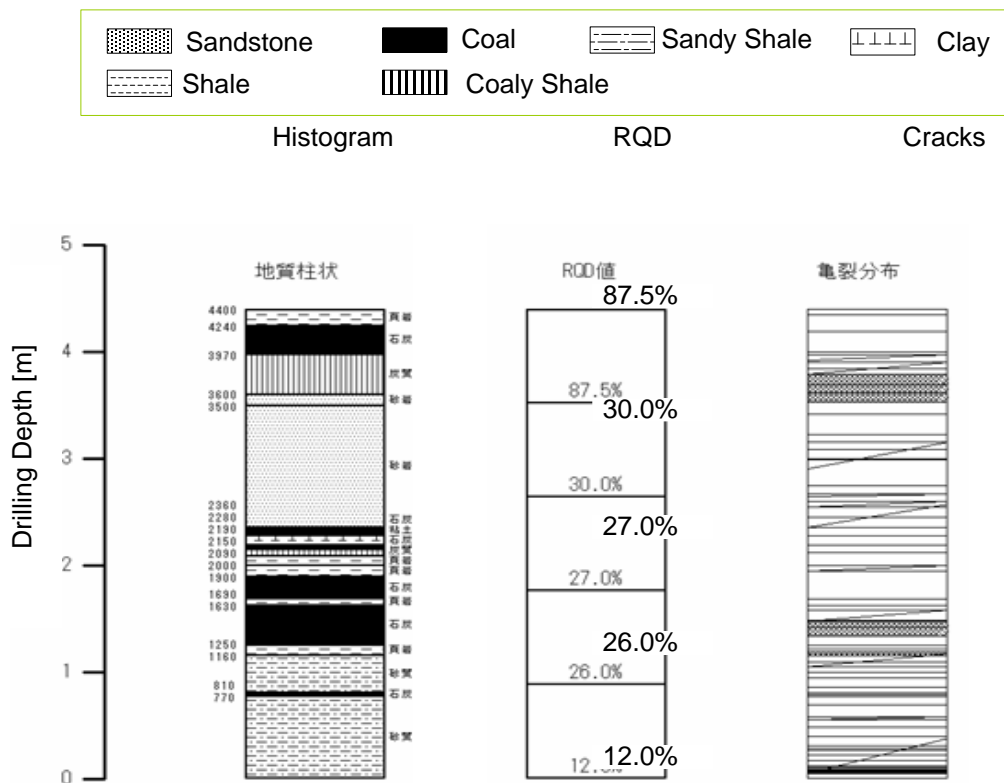


Figure 5.20: Histogram of Core B (KUSHIRO Coal Mine).

5.3.2 不連続面位置の検出

解析結果とコアボーリングとの比較を Figure 5.21 に示す. 2 孔のコアボーリングによるコア内の不連続面位置と解析結果を対比すると, RQD 値が高い箇所では推定された不連続面位置 (丸印) が少ない傾向が見られる. Table 5.3 は, 1メートル毎の RQD 値と推定された不連続面の個数を示す. Figure 5.22 は, 1メートル毎に RQD 値と不連続面の個数の関係を示す. 同図より, RQD が大きくなると, 推測した不連続面の数が小さくなることがわかる.

推定した岩層構造の可視化結果を, Figure 5.23 に示す. 坑道やロックボルト孔の配置, 数が3次元的に把握できる. また, 機械量から推定した地層構造, すなわちロックボルト孔に沿った亀裂と, 岩層境界面の分布も直感的に確認できる.

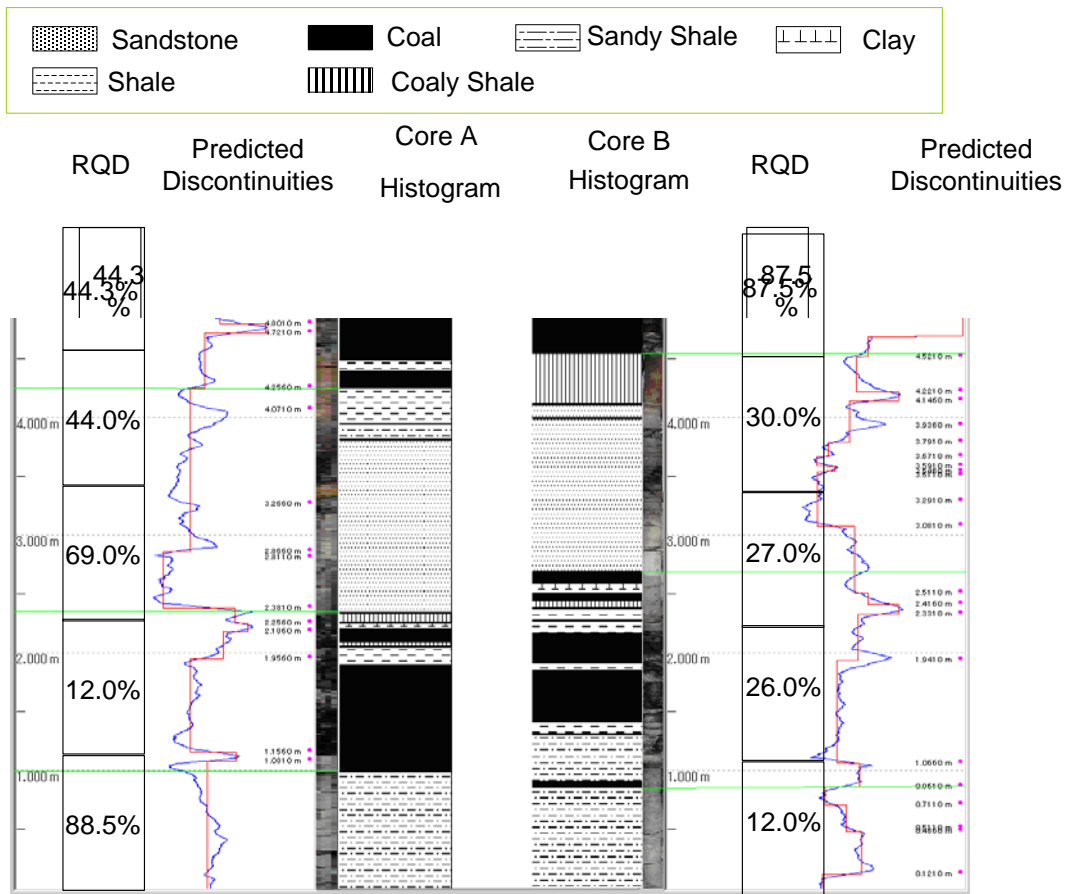


Figure 5.21: Predicted discontinuities and the histogram of Core A&B.
 (The red points represent the predicted discontinuities.) (KUSHIRO Coal Mine)

Table 5.3: Predicted discontinuities and RQD of Core A&B (KUSHIRO Coal Mine).

Core	Drilling Depth	Discontinuities	RQD
A	0m-1m	0	89%
	1m-2m	3	12%
	2m-3m	5	69%
	3m-4m	1	44%
	4m-5m	4	44%
B	0m-1m	4	12%
	1m-2m	3	26%
	2m-3m	3	27%
	3m-4m	7	30%
	4m-5m	3	88%

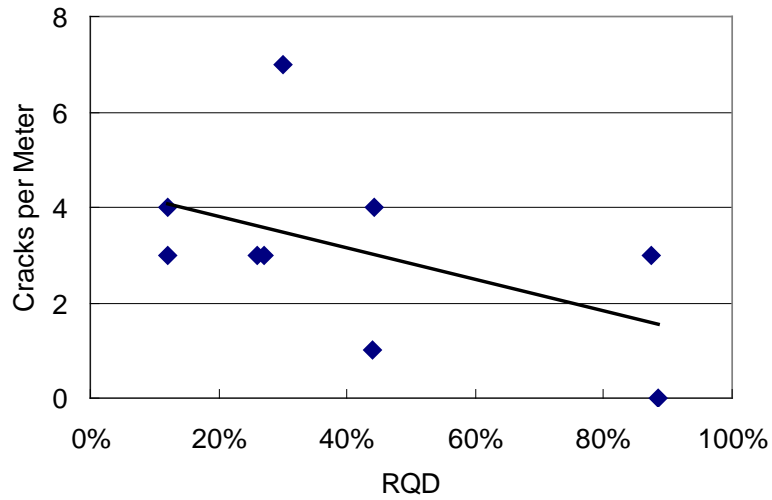


Figure 5.22: Predicted discontinuities and RQD of Core A&B (KUSHIRO Coal Mine).

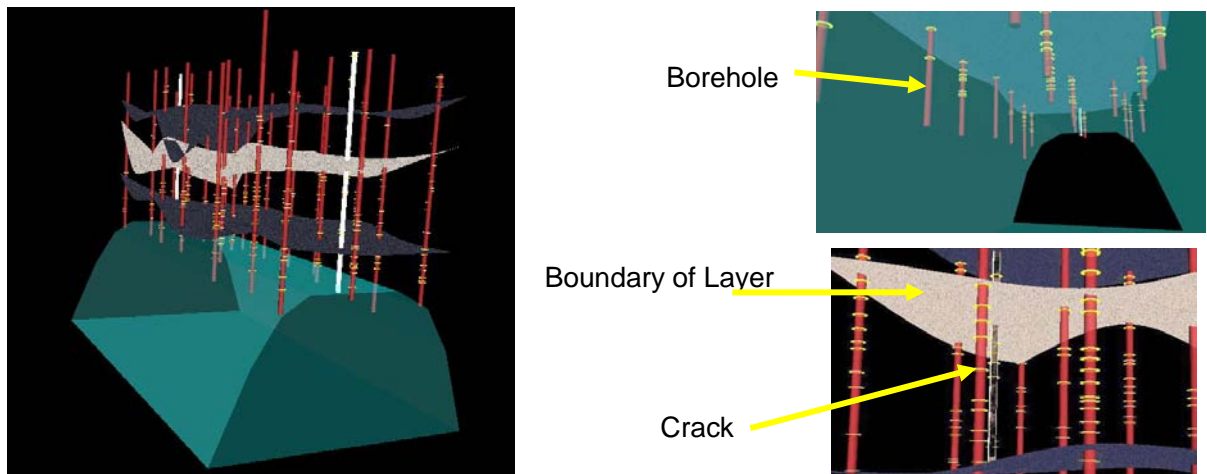


Figure 5.23: 3D display of discontinuities (KUSHIRO Coal Mine).

5.4 豪州 NRE 炭鉱の RTV における Trussmaster Mark II の現場試験

岩石の一軸圧縮強度を推定する手法と結果の可視化を検証するために、Trussmaster Mark II を用いて、現場削孔試験を行なった。

5.4.1 試験概要

現場試験は、豪州 NRE 炭鉱の RTV (Rubber Tire Vehicle) 坑道において実施した。NRE 炭鉱はインドのコークス会社 Gujarat NRE Coke Ltd が昔の South Bulli 炭鉱を買い取り、平成 17 年 9 月下旬から生産を開始した炭鉱である。RTV 坑道は NRE 炭鉱が新規展開のために掘削中の坑道であり、傾斜が 1/10 と比較的勾配のきつい坑道である (Figure 5.24)。断層

が存在するために、RTV 坑道は坑口から 108 m の地点より右側に曲がっている。試験はこの曲がり地点より手前、坑口よりおよそ 70~85 m の場所で行なわれた。この地点はすぐ上に Bulli 炭層があるので、地層変化が読みとりやすいのではないかと予想されたからである。RTV 坑道の坑口の様子を Figure 5.25 に示す。合計 17 本のボーリング孔を削孔した。削孔条件と記録は付録 3 の Table 1 に示す。

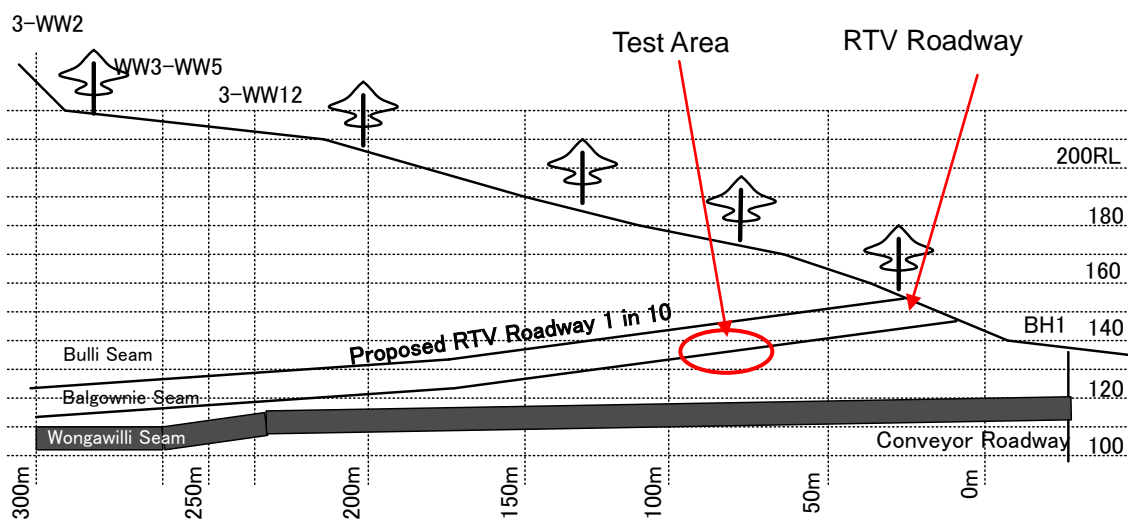


Figure 5.24: RTV Roadway.



Figure 5.25: Entrance of RTV Roadway.

5.4.2 体積比エネルギーと一軸圧縮強度について

1) 推定手法について

第 2 章では、削孔分析モデルを提案し、有効体積比エネルギーと岩石の一軸圧縮強度の比例関係を表す計算式を誘導した (式(2.32))。この式により、有効体積比エネルギーから岩石の一軸圧縮強度を推定する計算式は次式になる。

$$C_o = k \cdot EEs \quad (5.1)$$

C_o : 岩石の一軸圧縮強度 (MPa)

EEs : 有効体積比エネルギー (MPa)

k : 係数

式(5.1)により、有効体積比エネルギーから岩石の一軸圧縮強度を推定できる。ただし、 k は削孔機やビット、削孔条件 (給水量、切屑、推力やトルク、回転速度の安定性) により決まる定数である。 k については、理論的に誘導することは困難であるため、本研究では、試験データから直線回帰分析により求める。以下、現場試験のデータを利用し、 k を求め、式(5.1)を用いた一軸圧縮強度の推定方法を報告する。

2) 一軸圧縮強度と体積比エネルギーの直線回帰式の求め

Figure 5.26 は、Figure 5.24 に示した削孔区域の削孔位置図である。この削孔区域から 14 番孔 ($\Phi 55$ mm, No core) の削孔機械量データと周辺にある 3 番孔 ($\Phi 55$ mm, Core) から採集したコアの物性値を用いて、一軸圧縮強度と機械量の関係式を求めた。コア物性値の測定方法は付録 1 で述べる。

3.4.4 に示したように、削孔体積比エネルギーと一軸圧縮強度の関係式を求めるためには、3つの方法がある。本節では、有効体積比エネルギーを用いた手法で両者の関係を求めた。手順は次のようになる。

Step 1 : No.14 孔の削孔機械量については、ストロークやトルク、推力、回転数を用いて、削孔深さ[mm/r]やトルク/推力、体積比エネルギーを計算した。Figure 5.27 は、一軸圧縮強度と各機械量 (推力、トルク、削孔深さ[mm/r]、トルク/推力、体積比エネルギー) を対比した図である。体積比エネルギーと一軸圧縮強度は、同様の変動傾向を示している。

Step 2 : 3.4.4 に述べたように、有効トルクを求める必要があるが、ビット底面の摩擦力と空転トルクなどの「切削に関与しない成分」を分離することは難しい。本研究では、Figure 5.28 に示すように、1回転当りの削孔深さが最小の場合のトルクを「削孔に関与しない成分」として扱った。Figure 5.28 に示すトルクと1回転当りの削孔深さの関係図において、一番左下にある点 (1回転当りの削孔深さが約 0.05 mm) に対応するトルク (約 5 Nm) がそれに相当し、これを「無効トルク」と呼ぶことにする。ここでは、この無効トルクが式(2.26)の第 2 項 (摩擦トルク) と第 4 項 (空転トルク) の和に相当する。トルクからこの「無効トルク」を差し引いたものを「有効トルク」として扱った。

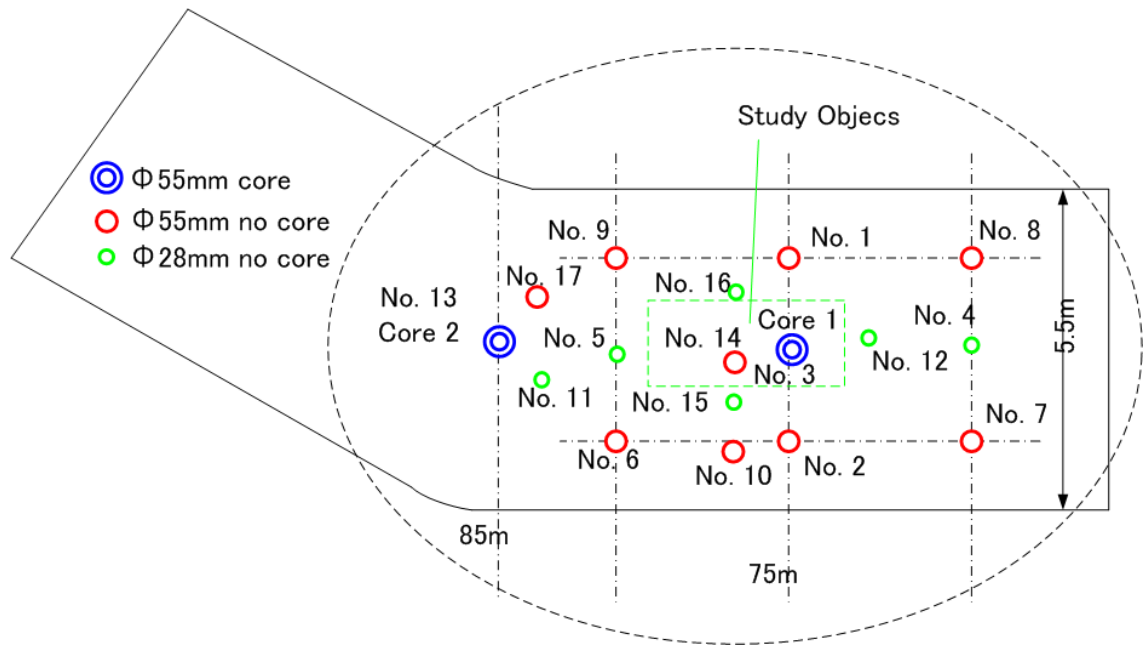


Figure 5.26: Layout of the holes.

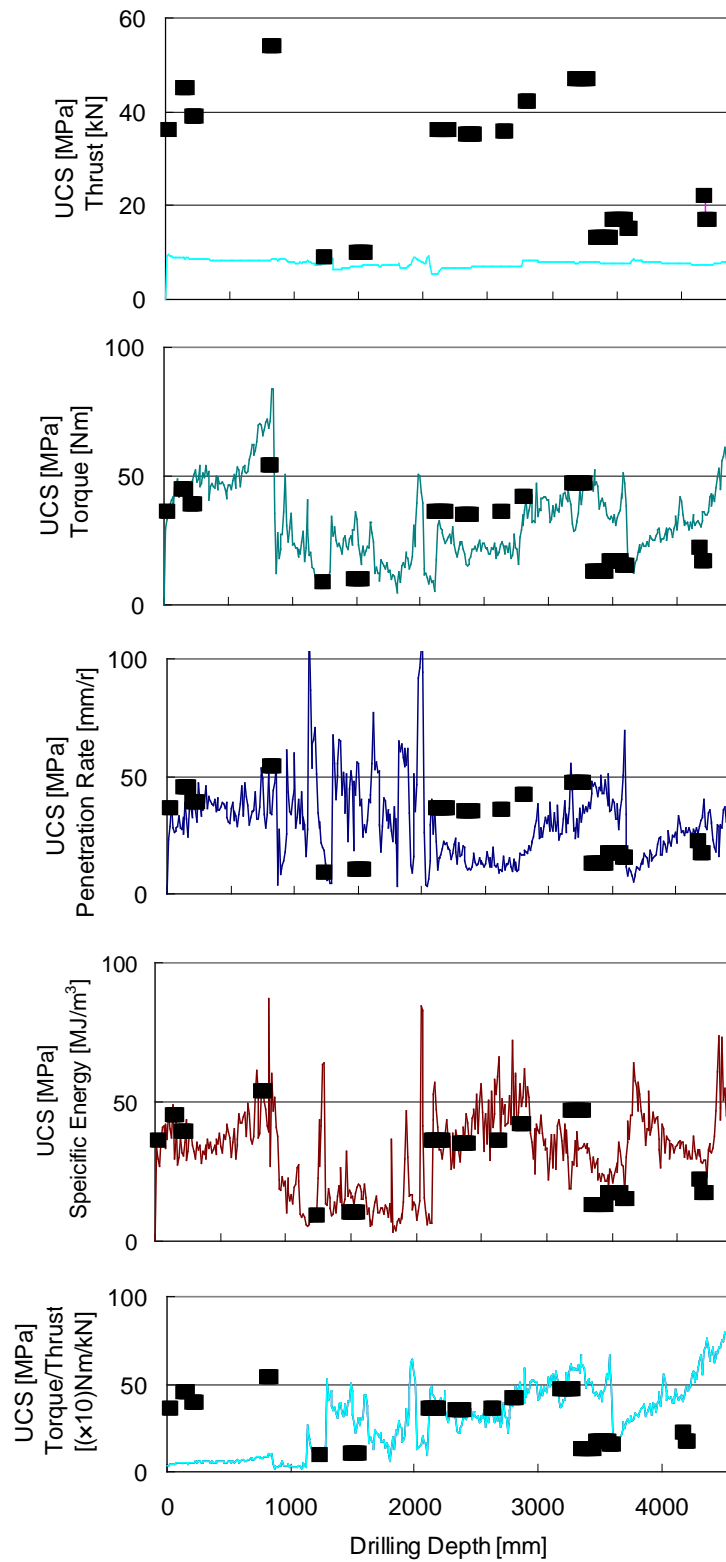


Figure 5.27: Mechanical data of Hole 14 and UCS (RTV Roadway of Gujarat NRE No. 1 Coal Mine).

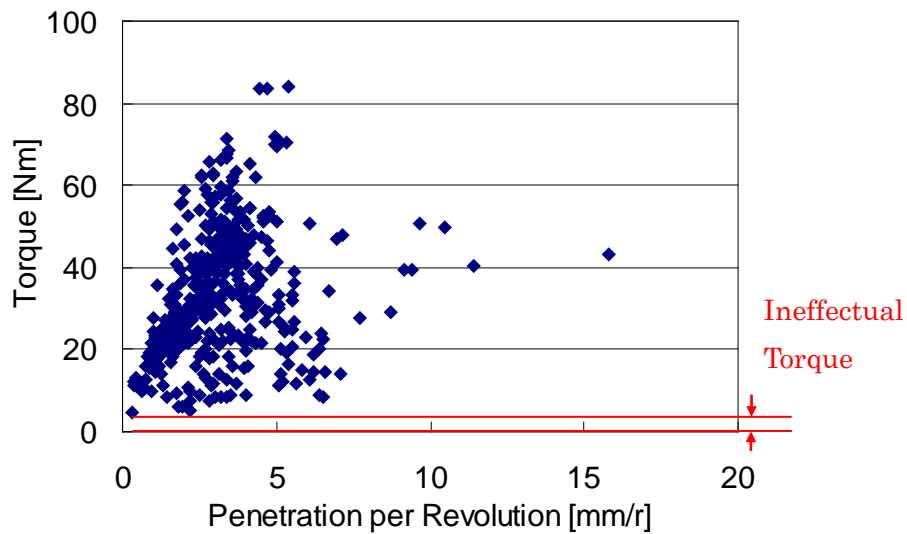


Figure 5.28: Min torque (Hole 14, RTV Roadway of Gujarat NRE No. 1 Coal Mine) .

Step 3 : 「有効トルク」を用いて，有効体積比エネルギーを計算した．Figure 5.29 には，青い線が有効エネルギーを表している．赤い線の総エネルギーに比べ，変動傾向は同じであるが，変動幅が小さくなることから分かる．これは，1回転当たりの削孔深さが小さい時，ビット底面の摩擦や空転トルクを除いたことによる．

Step 4 : No.3 孔 (Φ55 mm, Core) から採集したコアから，円柱形試料 (直径Φ10 mm, 長さ20 mm と直径Φ20 mm, 長さ40 mm の2種類) 52 個を作製し，一軸圧縮強度を測定した．岩石のばらつきと測定誤差を軽減するため，同じ場所からできるだけ複数の試料を作り，これらの一軸圧縮強度の平均値を取った．利用できる一軸圧縮強度のデータ数は16 個だった．コアと円柱形試料の採集位置を Figure 5.30 に示す．一軸圧縮強度を含む各物性値を Table 5.4 に示す．

Step 5 : 各一軸圧縮強度のデータと対応する有効エネルギーに対し，回帰分析を行ない (Figure 5.31)，両者の関係式をまとめた．

$$UCS = 1.0074EEs, R^2 = 0.6706 \quad (5.2)$$

ここでは， UCS は一軸圧縮強度， EEs は有効体積比エネルギーである．係数 k は1 に近似するため，上式は次式のように近似できる．

$$UCS = EEs \quad (5.3)$$

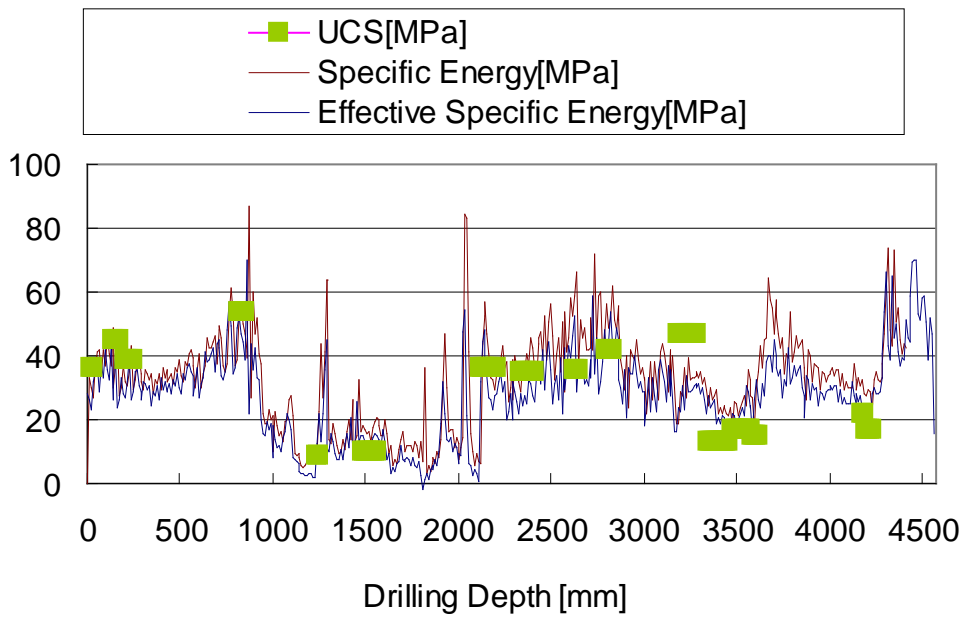


Figure 5.29: Specific energy and effective specific energy.
(Hole 14, RTV Roadway of Gujarat NRE No. 1 Coal Mine)

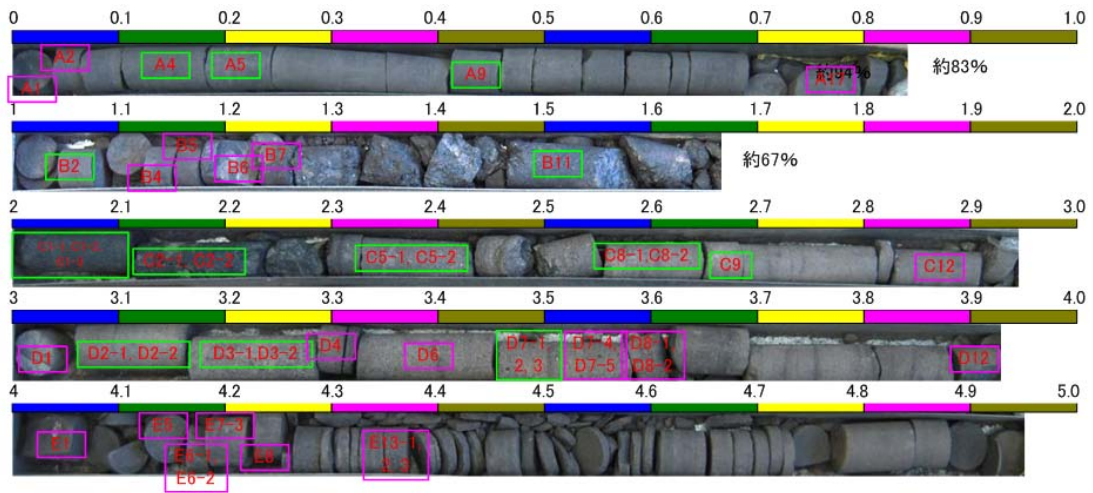


Figure 5.30: Core and locations of specimens (Hole 14, RTV Roadway of Gujarat NRE No. 1 Coal Mine).

Table 5.4: Properties of specimens from Core 1.
(Hole 14, RTV Roadway of Gujarat NRE No. 1 Coal Mine)

No.	Start [mm]	Rock Type	Shore Hardness	P Wave Velocity [m/s]	UCS [MPa]
A1	10	Mud Stone	36	1422	35.9
A4	120	Mud Stone	38	1290	45.5
A5	190	Mud Stone	40	999	38.6
B2	880	Mud Stone	40	768	53.7
B7	1220	Coal	41	1426	9.2
B11	1470	Coal	69	828	9.7
C2	2100	Sandstone	88	1769	35.8
C5	2320	Sandstone	29	1924	36
C9	2660	Sandstone	24	1292	35.8
C12	2820	Sandstone	23	993	42
D3	3170	Sandstone	34	2613	46.6
D6	3330	Sandstone	29	3017	13.1
D7	3460	Sandstone	30	2175	16.6
D8	3570	Mud Stone	25	1496	15.2
E6	4160	Mud Stone	24	1153	21.8
E7	4180	Mud Stone	20	3838	16.6

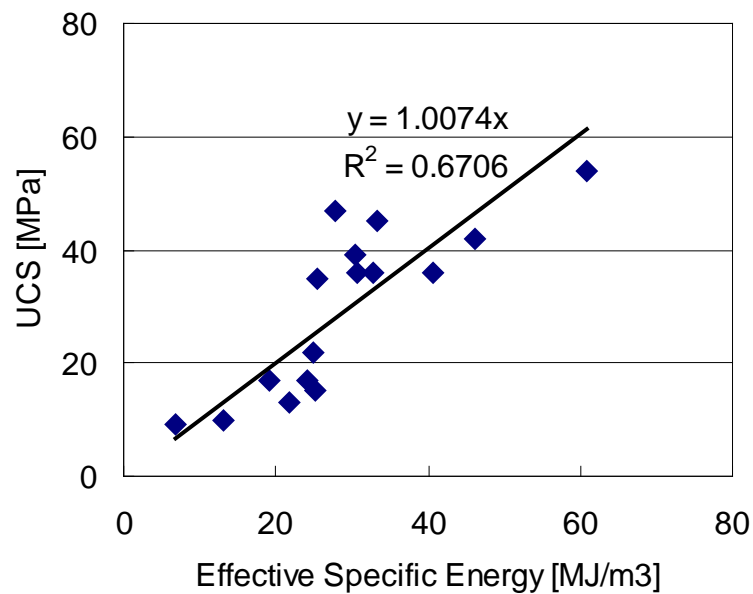


Figure 5.31: Effective specific energy VS UCS (RTV Roadway of Gujarat NRE No. 1 Coal Mine).

第 1 章で述べたように、Teale^{1.33)}と唐澤ら^{1.37)}は、岩石の破壊に要する体積比エネルギーの最低値は破壊の方法によらず、岩石の一軸圧縮強度に相当することを報告している。すなわち、式(5.3)は Teale と唐澤らの見解と合致する。

この回帰式を用いて、体積比エネルギーから一軸圧縮強度を推定する現場試験を行なった。この結果を 5.5 に述べる。

5.5 豪州 NRE 炭鉱の Adit20 坑道における現場削孔試験

天盤検層システムの有効性を評価するために、豪州 NRE 炭鉱の Adit20 坑道における現場試験を実施した。5.4 で求めた有効体積比エネルギーと一軸圧縮強度の関係式を用いて、天盤の一軸圧縮強度の分布を求め、手法の有効性を検証した。

5.5.1 試験概要

試験箇所は、水平坑道の坑口 (Adit20) から 100~200 m 程度入った区域である。試験区域付近の概観を Figure 5.32 に示す。図において黒く塗りつぶした区域で試験を実施した。坑道の敷幅は 5.0~5.5 m、高さは 2.3~2.8 m 程度であり、坑道から 7~8 m 上に 1930~40 年に採掘された旧坑が存在する。坑道の側壁付近に一部崩落が見られた。また、水が溜まっているために削孔が難しい箇所もあった。このような領域は避け、なるべく予定区域全体に渡ってデータが得られるように削孔位置を決定した。

試験は、対象となる坑道を Figure 5.33 のように 12 の区域に分け、それぞれの区域で基本的には 3 本、部分的にはそれより数本多く削孔し、合計で 48 本削孔を行なった。内訳は、 $\phi 27$ mm 孔が 1 本、 $\phi 28$ mm 孔が 31 本、 $\phi 55$ mm 孔が 15 本、 $\phi 55$ mm のコアボーリングが 1 孔である。削孔長は約 5 m、データロガーのサンプリング時間は 10 msec である。削孔条件と記録は付録 3 の Table 2 に示す。

試験現場の地質状態を把握するため、Figure 5.33 に示した区域⑤にコアボーリングを実施した。削孔位置の詳細図を Figure 5.34 に示す。このボーリングコアの写真を Figure 5.35 に、柱状図を Figure 5.36 に示す。天盤は概ね砂岩、頁岩で構成されており、天盤より 1~3 m 付近は比較的良好な状態であるが、3.5 m 以上では RQD 値も低く、亀裂も多く見られた。コア長は 4.88 m であった。コアの最上部では石炭が見られた。



Figure 5.32: Field plan view. (Adit20)

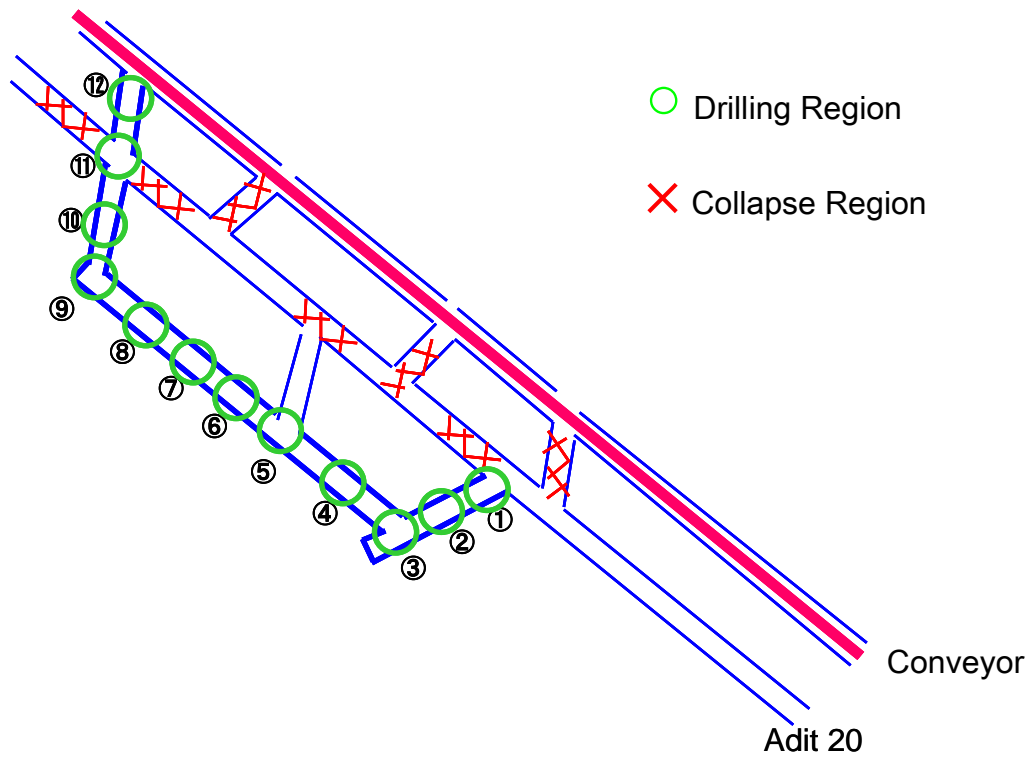


Figure 5.33: Drilling zone. (Adit20)

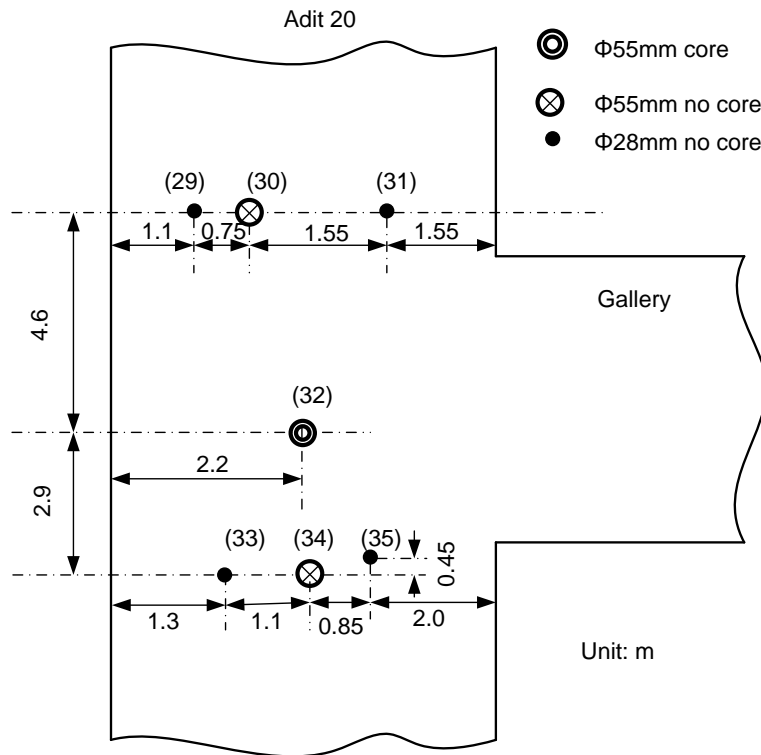


Figure 5.34: Detailed drilling zone. (Zone ⑤ in Adit20)

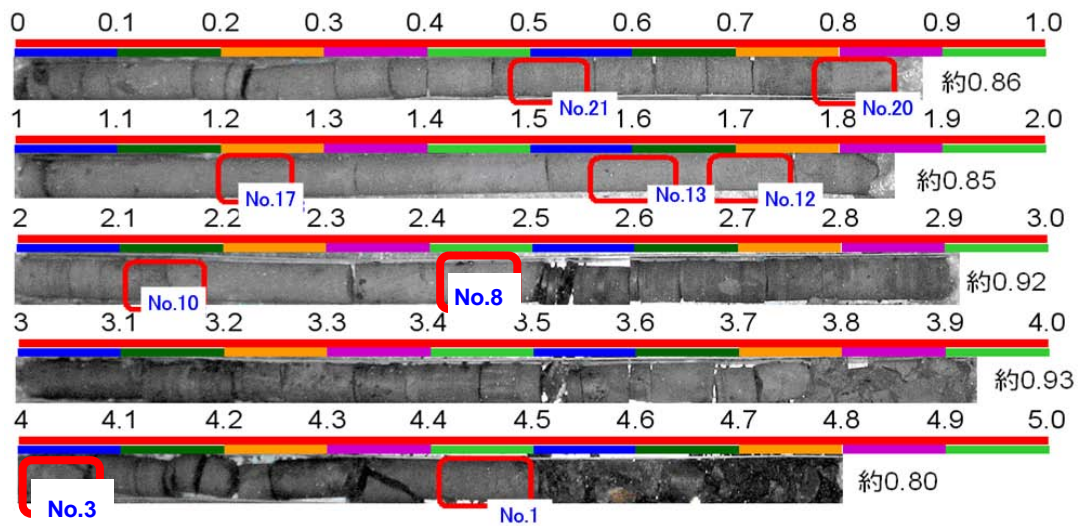


Figure 5.35: Core specimens (Marked are the distances from the roof).

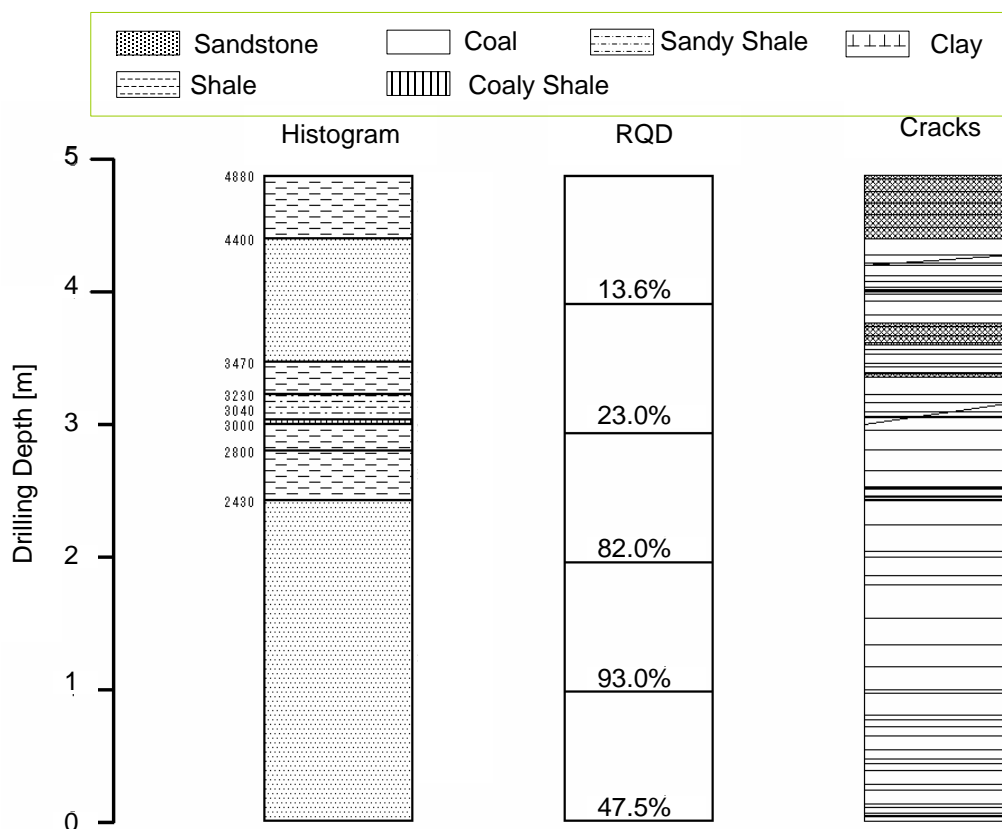


Figure 5.36: Core histogram.

5.5.2 一軸圧縮強度の推定

削孔機械量データと式(5.3)を用いて、有効エネルギーから一軸圧縮強度を推定する手法を検証する。

Figure 5.34 に示す削孔区域の 32 番孔 (Φ55 mm, Core) から採集したコアの物性値と 29 番孔 (Φ28 mm, No core) の削孔機械量データを対象にした。手順は次のようである。

Step 1 : No.29 孔の削孔機械量については、ストロークやトルク、推力、回転数を用いて、削孔深さ[mm/r]やトルク/推力、体積比エネルギーを計算した。

Step 2 : 29 番孔に対して、有効トルクを求めた。Figure 5.37 に示すトルクと削孔深さの関係図より、一番左下にある点 (1 回転当たりの削孔深さが約 0.02 mm) に対応するトルク (約 3 Nm) を「無効トルク」として差し引き、「有効トルク」を計算した。

Step 3 : 「有効トルク」を用いて、有効体積比エネルギーを計算した。

Step 4 : No.32 孔 (Φ55 mm, Core) から採集したコアを用いて、円柱形試料を (直径 Φ20 mm, 長さ 40-50 mm) 9 個を作製し、一軸圧縮強度を測定した。コアと採集位置を Figure 5.35 に示す。一軸圧縮強度を含む各物性値を Table 5.5 に示す。

Step 5 : 各試料に対応する有効体積比エネルギーを式(5.3)に代入し、一軸圧縮強度を計算し

た. 一軸圧縮強度の推定値と測定値の対比結果を Table 5.6 と Figure 5.38 に示す. No.8 の試料では, 推定圧縮強度と強度試験による値に大きな違いが見られた. この原因としては, 削孔長 3.5 m 付近の亀裂に介在している粘土の影響に因ると考えられる. この No.8 のデータを除いた一軸圧縮強度の平均推定誤差は, 17%内に収まった. すなわち, 推定手法は妥当であると判断される.

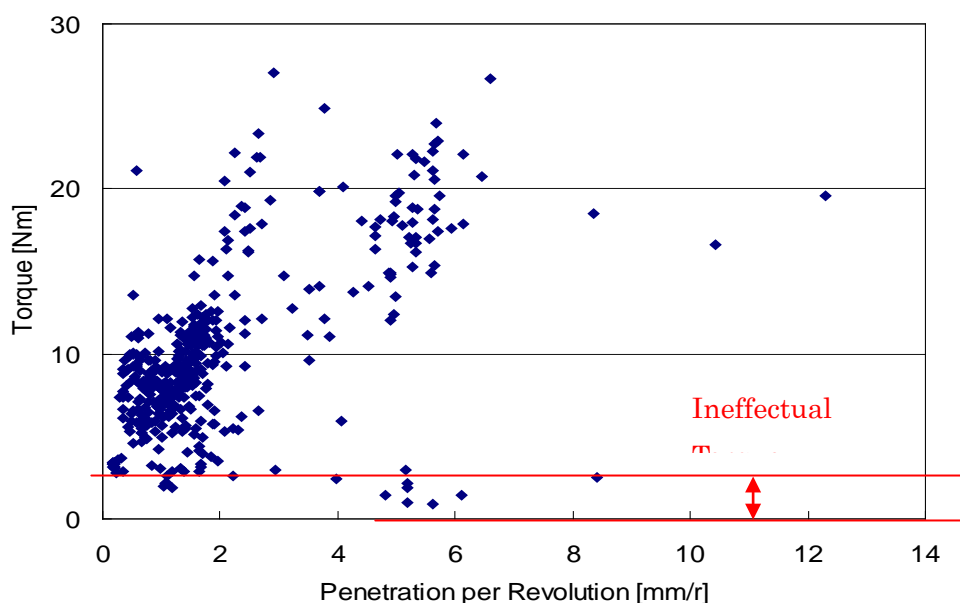


Figure 5.37: Min. torque (Hole29, Adit 20 in Gujarat NRE No. 1 Coal Mine).

Table 5.5: Properties of specimens (Hole32, Adit 20 in Gujarat NRE No. 1 Coal Mine).

No.	Position [mm]	Rock Type	Shore Hardness	P Wave Velocity [m/s]	UCS [MPa]
21	480	Sandstone	26	1955	36.3
20	780	Sandstone	32.2	2066	45.4
17	1200	Sandstone	28.4	1967	39.5
13	1560	Sandstone	25.8	2018	40.8
12	1680	Sandstone	25.4	1994	42.9
10	2100	Sandstone	29.2	1988	52
8	2420	Sandstone	31.6	1508	11.7
3	4020	Sandstone	24.8	1565	16.4
1	4420	Sandstone	32.2	1895	50.6

Table 5.6: Predicted values and measured values of UCS (Adit 20 in Gujarat NRE No. 1 Coal Mine).

No.	Effective Specific Energy [MPa]	Measured UCS[MPa]	Predicted UCS[MPa]	Absolute Error[MPa]	Relative Error
21	26.7	36.3	27.4	8.6	24%
20	55.2	45.4	54.2	9.2	20%
17	46.6	39.5	46.2	6.2	16%
13	37	40.8	37.1	3.9	10%
12	46.9	42.9	46.4	3.4	8%
10	51.4	52	50.6	1.4	3%
8	105.1	11.7	101.1	89.1	743%
3	9.1	16.4	10.9	5.1	32%
1	65.4	50.6	63.8	12.8	25%

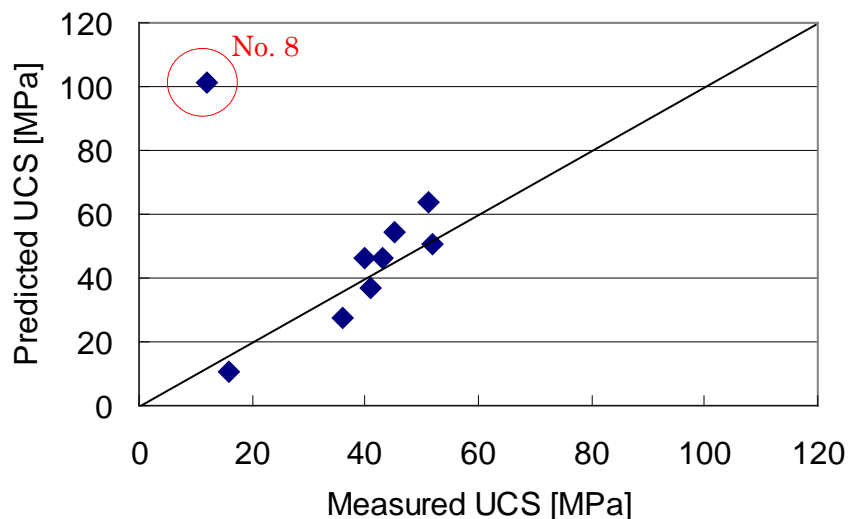


Figure 5.38: Predicted values and measured values of UCS (Adit 20 in Gujarat NRE No. 1 Coal Mine).

5.5.3 一軸圧縮強度の可視化表示

前節の一軸圧縮強度と体積比エネルギーの関係式を用いて、RTV 坑道のコアボーリング孔の周辺にある 6 孔の一軸圧縮強度の推定を行なった。一軸圧縮強度の大きさより、岩層を軟 (<20 MPa)、中 (20-50 MPa) と硬 (>50 MPa) の 3 段階に分け、グレースケールで表示した。Figure 5.39 は、RTV 坑道の試験データから推定した結果である。同図では、真中の円柱がコアである。全体的に下部の一軸圧縮強度が低く、上部が高い。コアボーリングの回りの 6 孔の内、29 番、30 番、33 番、35 番の 4 孔の岩石強度分布は、コアと一致する。31 番と 34 番の 2 孔の分布はやや異なり、地層構造が場所により変動していたと考えられる。この可視化表示方法により、天盤地層の一軸圧縮強度の分布状況を直感的に把握する

ことができる。

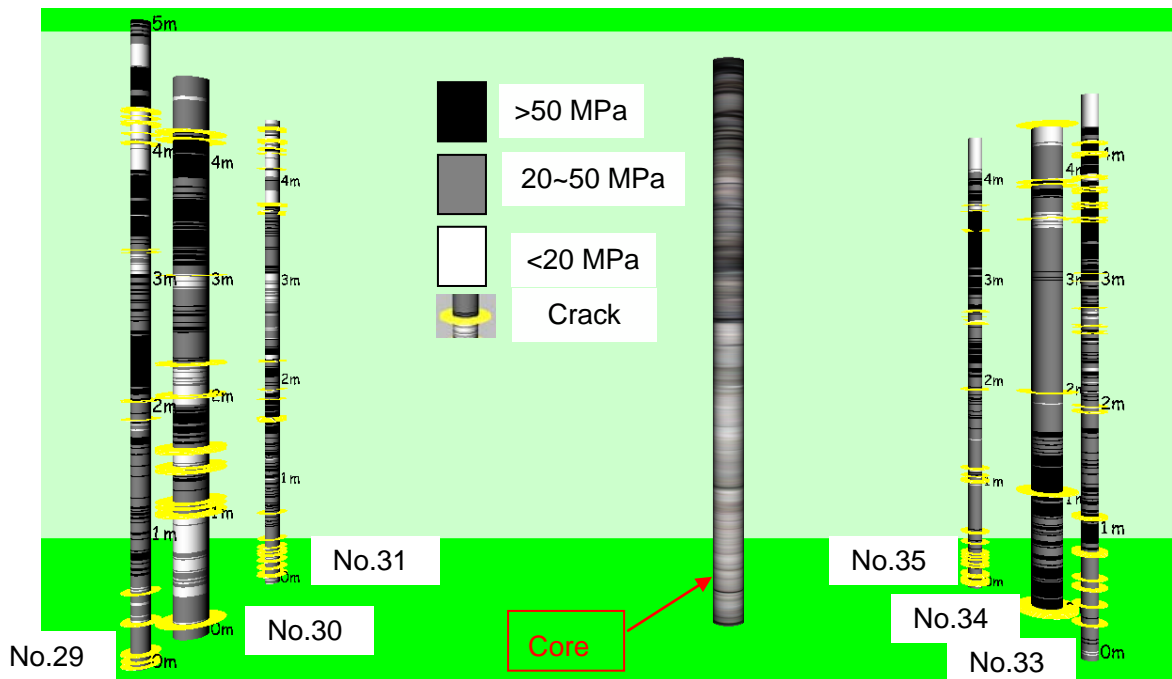


Figure 5.39: Prediction of UCS displayed with VRML.

(Tests in RTV Roadway, Gujarat NRE No.1 Coal Mine, Australia)

5.5.4 不連続面位置の検出

不連続面を検出するため、削孔機械量データを解析した。解析結果とボーリングコアの比較を Figure 5.40 に示す。亀裂は、特に軟弱な地層部分に検知できた。しかし、一部地層境界の判定については、必ず一致していない。これは、岩盤強度が徐々に変化するような場所において見られた。このような箇所については、解析条件の再考が必要である。また、無理な削孔を行なうと、急激に推力や回転数が変化するため、データが大きくばらつく。今後は、削孔や再解析条件の最適化が望まれる。

また、VRML による可視化結果を、Figure 5.41 に示す。同図より、天盤の地層構造や、岩相境界面、亀裂、ロックボルトの削孔位置分布の様子を直感的に把握することができる。

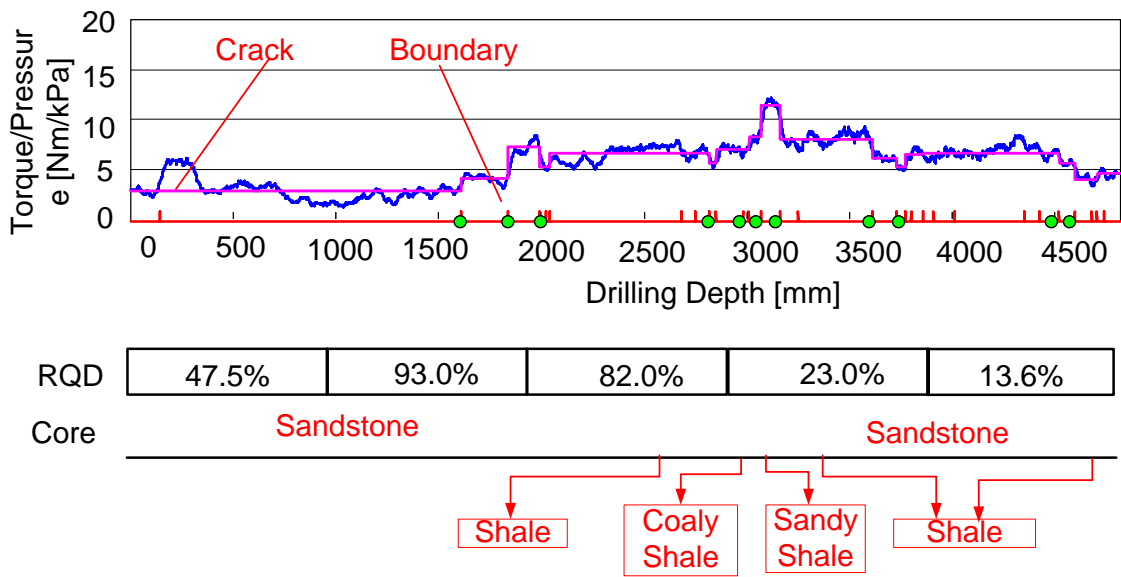


Figure 5.40: Predicted discontinuities and the histogram of the core.
 (The green points represent the predicted discontinuities.)

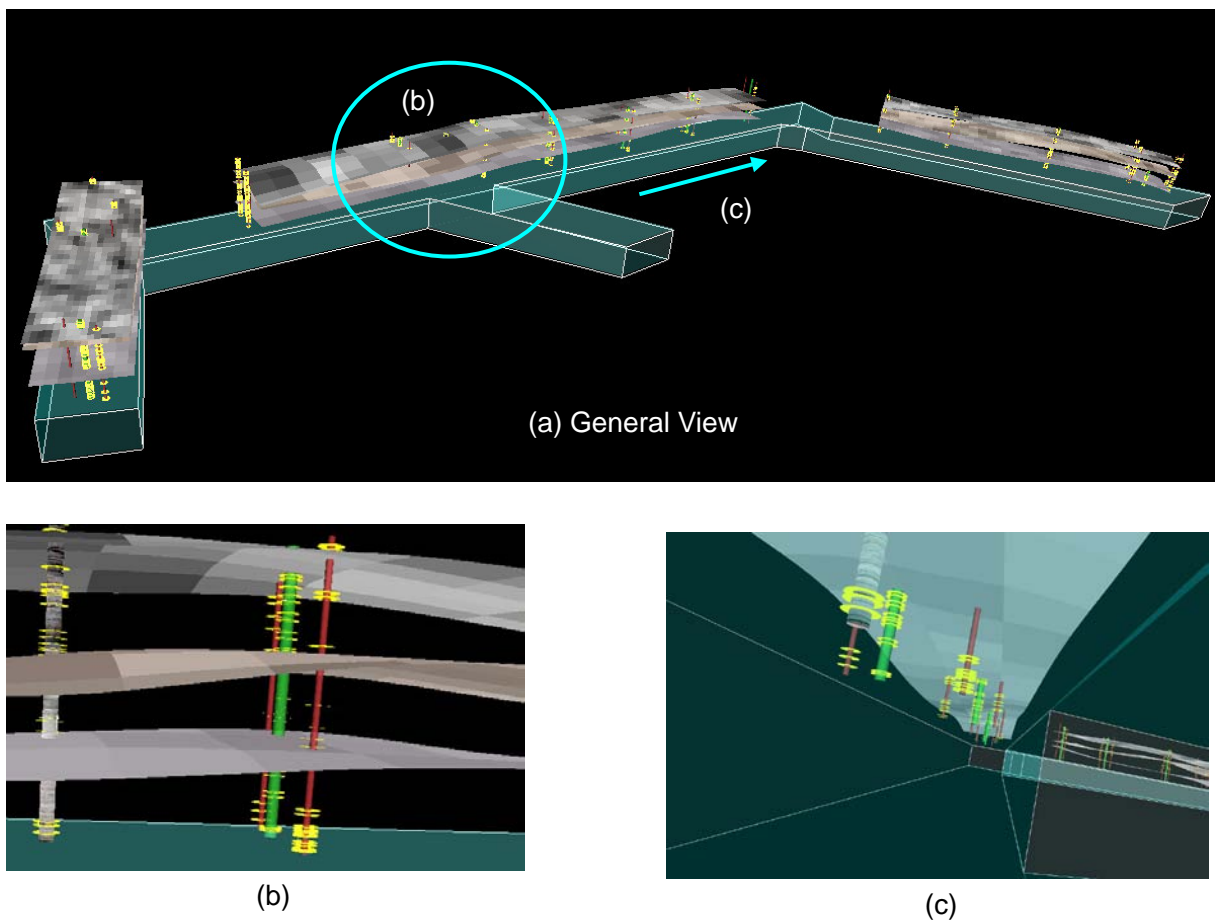


Figure 5.41: 3D display of discontinuities (Tested in Adit 20, Gujarat NRE No.1 Coal Mine, Australia).

5.6 本章のまとめ

天盤検層削孔システムを用い、工場試験と釧路コールマイン及び豪州 Gujarat NRE No.1 炭鉱で現場削孔試験を実施した。その結果をまとめると、以下のようなものである。

1) 工場試験と現場試験を行ない、トルク/推力から不連続面の位置を検出した。検出した不連続面の個数は RQD 値に対応し、RQD 値が高くなる場合（連続性が良い）、推定された不連続面の個数も低くなることがわかった。

2) 現場試験のデータを用いて、トルクと削孔深さ (mm/s) のグラフから「無効トルク」を求め、有効トルクと有効体積比エネルギーを計算した。その有効体積比エネルギーから岩石の一軸圧縮強度を推定した。現場から採取したコアの測定値と比較すると、平均推定誤差は 17% で、手法の有効性を確認した。

3) VRML で天盤構造の可視化表示を行ない、天盤構造、亀裂、岩層境界面、一軸圧縮強度を 3 次元的に表現することができた。

第6章 総括

6.1 本論文のまとめ

本研究では、ロックボルトの削孔機械量データを用いて、岩石の物性値と不連続面位置を推定し、天盤構造を把握する手法の開発を目指した。この本研究の目的が達成されたなら、ロックボルト支保施工の品質が向上し、坑内掘に伴う落盤災害を防止する一助になる。最終的に、削孔中にトルクや推力、ストロークと回転数などの削孔機械量を計測、記録できる天盤検層削孔機を開発できた。また、削孔分析モデルを提案し、機械量と岩石一軸圧縮強度の関係式を誘導し、室内試験によりそれを検証した。さらに、削孔岩盤内の不連続面位置の検出手法も検討し、工場試験により手法の有効性を確認した。最後、炭鉱で現場試験を行ない、本研究で開発したソフトウェアを用いて、削孔機械量データを解析し、岩石の一軸圧縮強度を推定したり、不連続面位置を検出した。天盤検層削孔機の有効性と実用性の可能性を見出した。これらの本研究の成果を、以下に列挙する。

6.1.1 回転式削孔機を用いた切削型ビットの削孔分析モデルの構築。

実験室に高速ビデオカメラを用いて、切削型ビットの回転式削孔過程を観察することにより、削孔分析モデルを構築した。以下に得られた結果を述べる。

1) 提案したモデルは、削孔過程が連続的な切削(cutting)とビットの送り(feed)の2つの運動で表す。

2) 切削運動については、西松の切削理論に基づき、ビットの刃先に「仮想底面」を仮定し、刃先に作用する推力と摩擦力を誘導した。

3) ビットの送り運動は圧入過程とみなし、Mateus の圧入理論を援用した。ビットの「仮想底面」の面積や、ビットの送り抗力と一軸圧縮強度の関係式を導いた。

4) 切削とビットの送り運動を合わせて考慮し、削孔トルクと体積比エネルギーの関係式を誘導した。

① 削孔トルクの式は、切削トルク、逃げ面の摩擦トルク、ビットの送りトルクと空転トルクの4つの部分から構成される。

② 同じように、削孔の体積比エネルギーは、切削、摩擦、ビットの送りと空転による4つの項からなる。逃げ面の摩擦力と削孔機の空転によるトルクは削孔エネルギーと関わらない成分である。

③ 有効体積比エネルギーは、ビットの送り速度に独立であり、一軸圧縮強度との間に比例関係が存在する。

5) 提案した削孔分析モデルをダイヤモンド・コアビットによる岩石削孔試験に適用し、モデルの有効性を確認した。これにより、ダイヤモンド・コアビットにも適用可能で、汎

用性のあるモデルであることがわかった。

6.1.2 室内削孔実験による削孔分析モデルの検証

室内削孔実験装置（MWD 装置）を作製し、削孔実験を行ない、削孔分析モデルと理論式を検証した。

- 1) 推力が上昇すると、トルクと1回転当たりの削孔深さも上昇する。一方、体積比エネルギーは低くなる。トルク/推力も変動することを確認した。
- 2) トルクは、材料の一軸圧縮強度に比例した。
- 3) 体積比エネルギーは材料の一軸圧縮強度に比例した。これにより、体積比エネルギーから一軸圧縮強度を推定することが可能である。
- 4) 削孔深さ（mm/r）が小さいほど、体積比エネルギーが大きくなる傾向があった。
- 5) 不要なトルクを除去した有効体積比エネルギーは、削孔深さ（mm/r）と独立していた。
- 6) 体積比エネルギーから一軸圧縮強度を推定する、3つの手法を提案した。
 - ① 体積比エネルギーの平均値を用いて、直接的に一軸圧縮強度を推定する。しかし、無効成分も含まれるので、推定精度は低い。
 - ② 一定の削孔深さ（mm/r）に対応する体積比エネルギーを比較する。方法③より容易であり、岩種の特定に有効である。しかし、無効成分も含まれ、推定精度は低い。また、データ数が少ない場合に、推定が難しい。
 - ③ 無効なトルクを除き、有効体積比エネルギーを求める。無効なトルクを十分除くことが難しいが、推定精度は高い。
- 7) ダイヤモンド・コアビットの削孔試験により、岩層境界面と亀裂の識別を試みた。体積比エネルギーとトルク/推力による識別の結果、トルク/推力の方が容易であることがわかった。

6.1.3 天盤検層削孔機の開発

天盤検層削孔システムのハードウェアシステムは、削孔機、センサ、データロガーで構成される。センサは推力、トルク、ストローク、回転数の4つの基本的な機械量を計測し、データロガーで記録する。ハードウェアシステムの特徴は、以下のようになる。

- 1) データロガーを含め、ハードウェアの防爆化を図った。
- 2) ベースにした削孔機は圧気式であり、比較的軽量で移動が容易である。
- 3) 回転モータと推力モータを駆動する圧縮空気は、独立的に供給される。従って、トルクと推力を独立して設定できる。
- 4) **Stinger** を床面・天盤に固定し、遠隔で削孔作業が可能のため、削孔作業が安全に行なえる。

ソフトウェア **ITMS** による信号処理手順は以下の通りである。

- 1) バイナリデータをアスキーデータに変換。

- 2) 削孔停止時間のデータを除去.
- 3) 時系列データをログデータに変換.
- 4) 岩石の一軸圧縮強度の推定.
- 5) ニューラルネットワーク手法による不連続面の検出.
- 6) 推定した天盤構造の可視化.

これにより、岩石の一軸圧縮強度の推定や、不連続面の位置と岩層の変化を検出することが可能になった。

6.1.4 天盤検層削孔機の工場試験と現場試験

天盤検層削孔システムを用い、工場試験と釧路コールマイン及び豪州 Gujarat NRE No.1 炭鉱で現場削孔試験を実施した。その結果をまとめると、以下のようなものである。

1) 工場試験と現場試験を行ない、トルク/推力から不連続面位置の検出を試みた。検出した不連続面の個数は RQD 値に対応し、RQD 値が高い場合（連続性が良い）、推定された不連続面の個数が低くなった。

2) 現場試験のデータを用いて、トルクと削孔深さ (mm/s) のグラフから「無効トルク」を求め、有効トルクと効体積比エネルギーを計算した。その有効体積比エネルギーから、岩石の一軸圧縮強度を推定した。現場から採取したコアの測定値と比較すると、平均推定誤差は 17% に達し、手法の有効性を確認した。

3) VRML により天盤構造の可視化表示を行なった。天盤構造、亀裂、岩層境界面、一軸圧縮強度を、3 次元的に把握できるようになった。

6.2 今後の展開

本研究では、ロックボルトの削孔機械量データを用いて、岩石の物性値と不連続面位置を推定し、天盤構造を把握できる手法を提案することができた。しかし、岩石の物性値や不連続面位置をより精度良く推定するためには、今後、以下のような問題を解決する必要がある。

1) 削孔分析モデルの式(2.26)と式(2.32)について、実験データを増やし、それぞれ定量評価する必要がある。

2) 今回提案した削孔分析モデルにおいて、仮想底面の面積と摩擦力および摩耗の関係を詳細に検討すれば、ビット寿命の予測等への活用も期待できる。

3) 刃先形状の違いが岩石の局所破壊に与える影響を考慮した削孔メカニズムを、検討する必要がある。これにより、ビット形状の異なる様々な削孔においても、岩石物性の推定や不連続面位置の推定が可能になると考える。

4) 本研究では、トルク/推力を用いて不連続面位置を検出する手法を用いたが、この手法は経験的な手法であり、理論的に優位性を示すことができていない。

5) 有効体積比エネルギーから一軸圧縮強度を推定する際には、無用なトルクの除去が重要である。現場データでは、「無用なトルク」の値が、削孔毎に変動する。おそらく削孔環境やオペレータの操作方法に起因していると思われるが、供給水量や切屑の影響を考慮して更に検討を進める必要がある。

6) 本研究では、岩石物性として一軸圧縮強度に重点を置いたが、機械量の変動から物性と共に岩種を特定できれば、現場では有益である。こうした試みが、今後必要である。

7) 不連続面の3次元的なつながり状況を、自動的に求めることができていない。坑道天盤の地層構造を自動可視化表示する場合には、不連続面同士の連結性を推定するアルゴリズムが必要と考える。

以上、本研究に関わる問題点と今後の研究課題を挙げた。これらの問題が解決され、天盤検層用削孔機の性能が向上することにより、落盤事故等の坑内災害が無くなることを願って本論文の結びとする。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、終始暖かい激励とご指導、ご鞭撻を頂いた室蘭工業大学大学院建設環境工学専攻教授板倉 賢一博士に心より感謝申し上げます。板倉 賢一博士は、これまでの研究活動を通じて、研究への取り組み方と方法論、研究者としての心構えのみならず、幅広い教養、世界観等を教えて下さいました。また、多くの論文発表等の機会も与えて下さいました。さらに、生活的、精神的面にもサポートして下さいました。心より感謝申し上げます。

建設環境工学専攻教授土屋 勉博士、生産情報システム工学専攻教授魚住 超博士にご指導を頂き、心より感謝申し上げます。

学位論文審査において、貴重なご指導とご助言を頂いた材料物性工学専攻教授後藤 龍彦博士、化学プロセス工学講座教授吉田 豊博士に心より感謝申し上げます。

修士段階の指導教官の矢吹 信喜先生（現在大阪大学教授）のお陰で、日本に留学することが実現でき、心より感謝申し上げます。

平成18年3月に博士後期課程を修了した志谷倫章博士（現在大成建設株式会社）には、研究生活及び私生活の面で多大なるご支援を頂きました。ここに感謝の意を表します。博士課程在学中、同期の徐 招峰さん、共同研究者として一緒に研究を進めてきた渡部 秀一さんを始め、可視化情報処理研究室の皆様に変にお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

工場実験と炭鉱の現場実験の実施にあたり、熱心なご協力をいただいた JCOAL・太平洋興発（株）、釧路コールマイン（株）、ならびに削孔機（ボルト打設機）メーカーの Rambor Ltd、データロガー製作会社の Ringway Control & Automation、現場の Gujarat NRE No.1 Colliery の皆様心より感謝申し上げます。室蘭工業大学機械システム工学科の塩崎 修技官には実験装置に御協力を頂き、心からお礼を申し上げます。

国際交流センター門沢 健也助教授、塩崎 泰子係長を始め皆様に日本語の勉強や留学生活にご協力を頂き、心から感謝申し上げます。日本語講師泰地 典子先生（故）、講師坂井明子先生（故）に丁寧なご指導を頂き、深謝致します。

論文をまとめる際に、友達岡 裕司さんに日本語のチェックにご指摘して頂き、誠に感謝いたします。

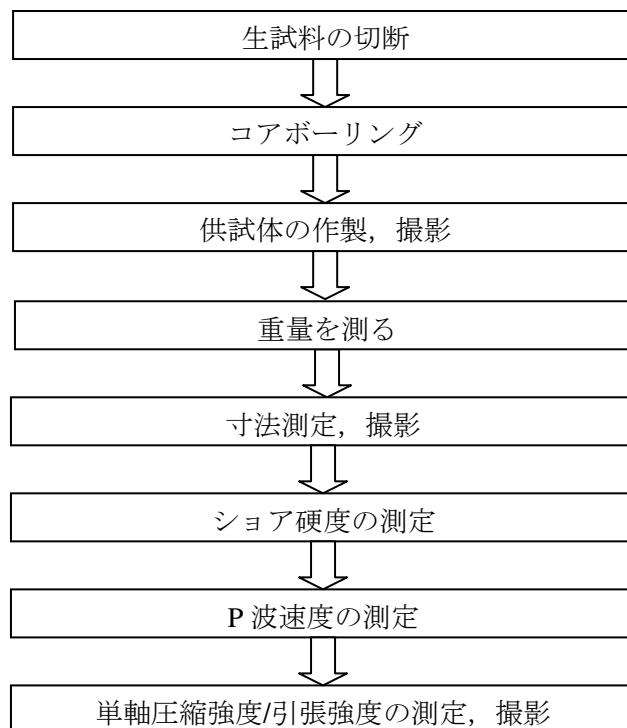
日本文部科学省奨学金を受けることにより、本研究を行うことができました。ここに深く感謝の意を表します。

また、いつもご激励、ご助言を頂いた大連交通大学の孔憲庶教授に心より感謝申し上げます。友達杜 春涛さん（現在北方工業大学副教授）、鄭 樹啓さん（現在中国石油大学副教授）の激励に頂き、30歳から学問の道に歩き始めました。ここに感謝の意を表します。最後、両親と家族、友達のご支援と理解に感謝します。

付録

付録 1 岩石物性値の測定方法について

1) 物性試験の流れ



2) 試験設備と試験条件

項目	設備	条件
一軸圧縮強度試験/引張強度試験	1. 万能材料試験機(Type 5586, Instron Corp.), 最大荷重300 kN	単軸圧縮試験用供試体の作製と試験は地盤工学会基準JGS2521-2000により実施した ¹⁾ . 供試体の直径は, 10 mm/20 mmの2種類とした. 供試体の高さは, 直径の2倍にした. 軸圧縮速度:



2. 小型材料試験機，最大荷重2 T



変位計 (DTH-A-10)



万能材料試験機：

0.1 mm/min.



小型材料試験機：

1-2 kg/cm²/sec

小型材料試験機での試験方法：使用した油圧式の载荷装置で、円柱試料に圧力を徐々に掛ける。試料が破壊された瞬間の荷重を計測して断面積で除した値を求める圧縮強度(MPa)とした。

引張強度を測定するために、圧裂引張試験を行った。供試体の作製方法と試験方法は地盤工学会基準JGS2521-2000を参考にして行った。円柱形供試体の直径は10 mm/20 mmの2種類で、供試体の高さは、直径の1倍にした。

	<p>Loadcell (LCW-2TC45S, 昭和測器)</p> <p>圧力計 (HVH-1000, 昭和測器)</p> <p>Data Logger (Graphtec GL900, グラフテック株式会社)</p> <p>アンプ (Strain Amplifier DPM-611A, 昭和測器)</p>	
<p>寸法測定とは かり</p>	<p>a) 供試体寸法測定器具</p> <p>ノギス (精度0.05 mm) /マイクロメータ (精度0.001 mm)</p> <p>b) はかり</p> <p>デジタル電子天秤 (CP4235, The Sartorius Group)</p> <p>精度0.001 g</p> 	
<p>供試体 作製器 具</p>	<p>切断機 (ISOMET2000 Precision Saw)</p> 	
<p>コアボ ーリン</p>	<p>ドリル : B13RH卓上ボール盤 (日立工機)</p>	

グ	 <p>変位計 (DTP-D-500S, 共和電業) Loadcell (LCN-A-2KN, 共和電業) トルク検出器 (SS-200, 小野測器) 磁電式回転検出器 (MP-981, 小野測器) ビット: ダイヤモンド・コアビット (直径Φ10, 20, 30 mm)</p>	
シヨア 硬度	<p>シヨア硬度計測計 (SHORE D, Imai Testing Machine MFG CO., LTD)</p> 	10回の計測を行ない、その平均を試料のシヨア硬度とした。
P波速度	<p>デジタル・オシロスコープ(Waverunner LT364L, 500 MHz, 1 GS/s, 岩崎通信機株式会社&レクロイ・ジャパン株式会社)</p>	円柱試料の両端に圧電素子センサを取り付



付録2 本研究で用いたニューラルネットワーク²⁾³⁾

ニューラルネットワークとは、神経細胞をモデル化したニューロンを構成素子とし、実際の神経系の構造や機能を模倣する情報保存と処理方法である。ニューラルネットワークの特徴は、下記のようなになる。

学習能力：入力データと対応する出力データから、対応関係（ルール）を学習することができる。学習が終わると、任意の入力データに対して、対応関係によって出力することができる。

適応能力：環境の変化により、改めて学習し、新しい環境を適応する能力がある。

柔軟性：騒音を除く、異常データを容認する能力がある。

ブラックボックス性：入力データと出力データの相関関係を自動的に模倣できるが、ルールを明確的に表示することができない。

ニューラルネットワークは文字や画像、音声の認識、ロボットの制御、様々な分野に活用されている。近年、土木分野への応用も盛んになっている。

ニューロンの概念図は Figure 1 に示される。他の n 個ニューロンからの入力 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ を信号として受け取り、それらにそれぞれの重み $w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n$ をかけ総和し、その結果で興奮するかを決めて出力する。つまり、重みが大きければそのニューロンからの入力の影響が大きいということになる。ニューロンは多入力 1 出力の素子であると考えられる。

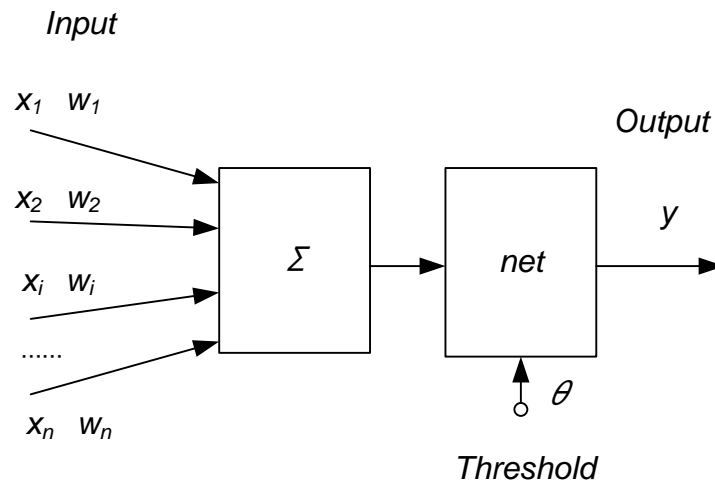


Figure 1: Concept of a neuron

総和 net は次式で表れる.

$$net = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (1)$$

総和が閾値 θ を超えた時に、ニューロンが興奮する. その時総和

$$u = net - \theta \quad (2)$$

また、 $n+1$ 番目の仮想ニューロンを加えて、結合荷重 $w_{n+1} = -\theta$ 、 $x_{n+1} = 1$ とすると、式 (1) と (2) を簡単に次式で書ける.

$$u = \sum_{i=1}^{n+1} w_i x_i \quad (3)$$

出力は

$$y = f(u) \quad (4)$$

ここで u は、他のニューロンからの出力に荷重を掛け、その総和から閾値 θ を引いたもの. f は、ニューロンの出力関数で、一般に単調非減少関数である. 出力関数については、線形関数、Ramp 関数、階段関数とシグモイド関数などが挙げられる. 下記のシグモイド関数はよく利用される (Figure 2) .

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}} \quad (5)$$

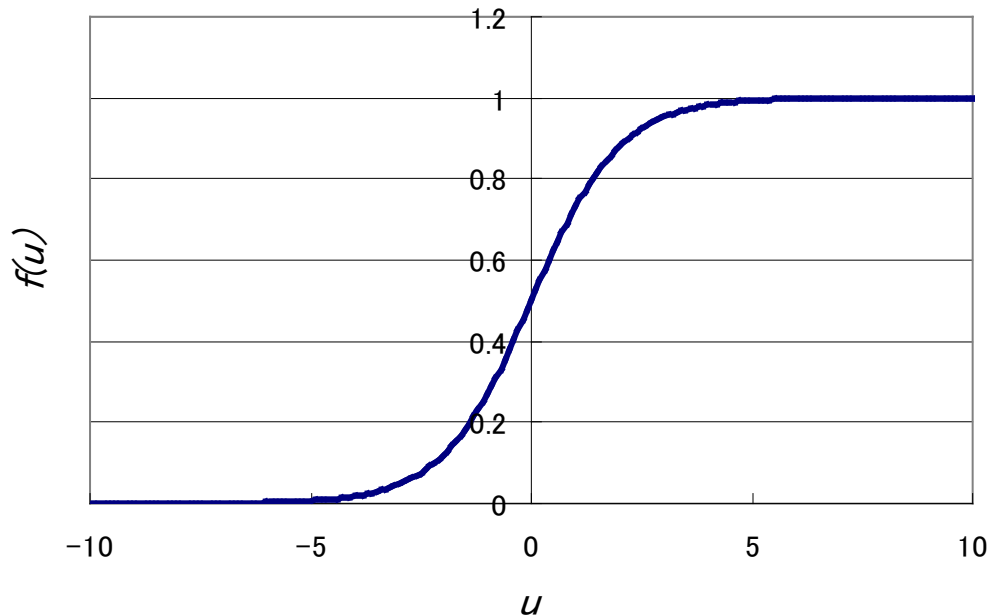


Figure 2: Sigmoid function

ニューラルネットワークをニューロン間の結合の様子に従って，相互結合型と階層型の2種類に分類できる．階層型ニューラルネットワークの構造は Figure 3 に示される．同図に示される三層型ネットワークは，入力層，中間層と出力層からなる．信号がネットワークの入力層に入力し，一連の計算を経て，出力層に結果を出す．

また，学習方法によつての分類がある．以下に，本研究で用いたバックプロパゲーションネットワーク（BPN）の教師あり学習則について述べる．

これは，Rumelhart と Hinton が提案したパーセプトロン型のアルゴリズムである⁴⁾．Figure 3 のような中間層を持つニューラルネットワークを考える．どの素子も左側の1層（下の層）のニューロンからのみ入力を受けることができるが，同じ層や右側の層から入力することが許されない．その一方，ネットワークの出力データと教師データ（目的データ）比較し，誤差を計算する．その誤差が許容誤差により大きい場合に，誤差を左側の層に運搬しながら重みを修正する．信号は基本的に入力層から中間層通して出力層へ流れるが，出力信号と目標信号の誤差を逆に出力層から入力層まで伝えるというフィードバックメカニズムである．

p 番目のパターンを与える時， j 番目のニューロンの入力は以下のように表せる．

$$u_{pj} = \sum_i x_{pi} w_{ji} \quad (6)$$

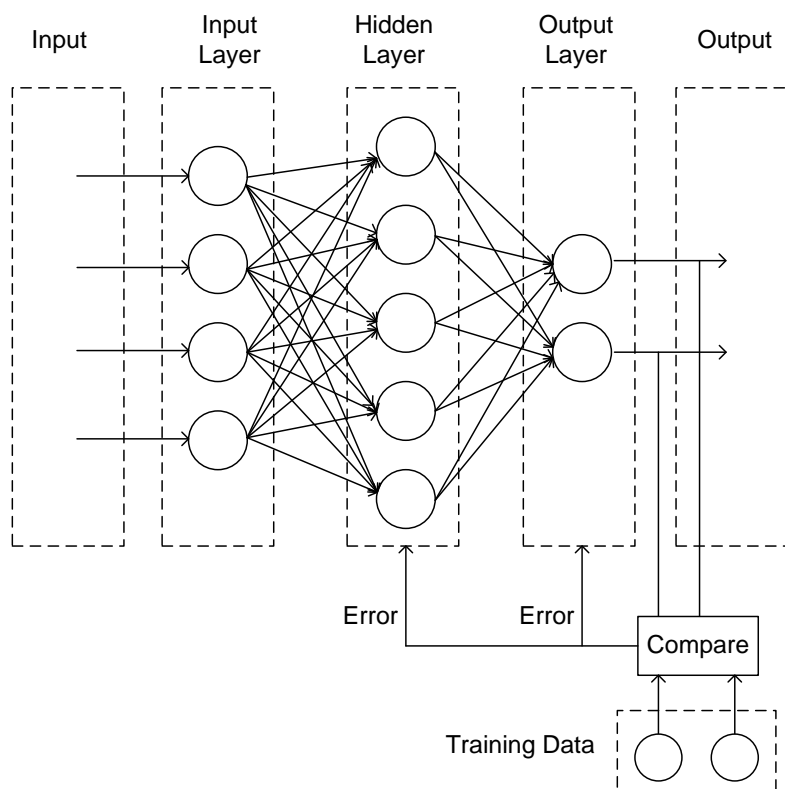


Figure 3: The most widely applied neural network technique: a BPN model

j 番目のニューロンの出力は

$$O_{pj} = f(u_{pj}) = \frac{1}{1 + e^{-\beta u_{pj}}} \quad (7)$$

ここで β は関数の変化する急激さを決定する定数である。

パターン p に対して、実際の出力値と教師データとの誤差関数 E_p は、以下の式で求められる。 O_{pj} ニューロンの実際の出力で、 T_{pj} 教師データである。

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_j (O_{pj} - T_{pj})^2 \quad (8)$$

結合荷重の修正量は、以下のように表せる。

$$\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial u_{pj}} \frac{\partial u_{pj}}{\partial w_{ji}} = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial O_{pj}} \frac{\partial O_{pj}}{\partial u_{pj}} \frac{\partial u_{pj}}{\partial w_{ji}} \quad (9)$$

ここで η は結合荷重を調整することの高速化のために設置した慣性項である。この式の中では、

$\partial u_{pj} / \partial w_{ji}$ が次のように計算できる。

$$\frac{\partial u_{pj}}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial}{\partial w_{ji}} \sum_k w_{jk} O_{pk} = O_{pi} \quad (10)$$

出力層に対しては， $\partial E_p / \partial O_{pj}$ が次式で表せる．

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{pj}} = -(T_{pj} - O_{pj}) \quad (11)$$

中間層の場合には

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{pj}} = -\sum_k \delta_{pk} w_{kj} \quad (12)$$

式 (9) の最後の項は

$$\frac{\partial O_{pj}}{\partial u_{pj}} = f'(u_{pj}) = \beta f(u)(1-f(u)) = \beta O_{pj}(1-O_{pj}) \quad (13)$$

のように表示できる．

式(10)，(11)，(12)，(13)を式(9)に代入して，中間層と出力層の各ニューロンの重みの修正値は以下のように表せる．

$$\Delta w_{ji} = \eta \sum_k \delta_{pk} w_{kj} \beta O_{pj}(1-O_{pj}) O_{pi} \quad (14)$$

出力層の各ニューロンの重みの修正値は

$$\Delta w_{ji} = \eta (T_{pj} - O_{pj}) \beta O_{pj}(1-O_{pj}) O_{pi} \quad (15)$$

となる．

以上がバックプロパゲーションのアルゴリズムである．このように任意なニューロンは簡単な計算機能だけを持つが，互いに繋がってネットワークになったら，学習能力や模倣能力，予測能力など様々な複雑な能力がある．

本研究での学習アルゴリズムは以下のようなになる．

Step 1: すべての結合荷重の初期値をランダムに設定する．さらに，学習率，慣性係数，許容誤差，最大学習回数とシグモイド関数の定数も設定する．

Step 2: 入力値を 0.1～0.9 の範囲に正規化する．

Step 3: 入力値と教師データを与える．

Step 4: 入力層から出力層に向けて，各ニューロンに対して，入力値と結合荷重によって，出力を計算する．

Step 5: 出力層から入力層に向けて，実際に計算した出力と教師データを比較し，誤差を

計算する。また、誤差の修正量も計算し、新しい結合荷重を与える。

Step 6: すべての教師データに対して、もし誤差が設定した許容誤差により小さいなら、学習が終了する。そうでなければ、step 2 から step 5 までに繰り返す。

付録 3 現場実験条件と記録

Table 1: Drilling conditions (RTV)

孔 No.	孔条件	ファイル名	備考
6/6			
①	φ55 mm ノンコア	H00003.its	Disk full 表示で計測停止
②	φ55 mm ノンコア	H00001.its	データ取れず
③	φ55 mm コア	H00010.its	データ破損, 復旧させるも信頼性疑問 1 回の削孔で約 1m コア採取可能. 実測孔長(1) 85 cm (2)189 cm (3) 289 cm (4) 388 cm (5) 488cm
④	φ28 mm ノンコア	H00002.its	データ OK, 削孔長 5 m 以上
⑤	φ28 mm ノンコア	H00003.its	4 本目でロガーフリーズ, データ破損
⑥	φ55 mm ノンコア		削孔中にロガーカバーのフックが外れバッテリー落下
6/7			
⑦	φ55 mm ノンコア	(1)H00021.its (2)H00022.its (3-5)H00023.its	ロガー電源が途中で切れる (接触不良が考えられる)
⑧	φ55 mm ノンコア	(1-4)H00024.its (5)H00025.its	5 本目でフリーズ, データ破損
⑨	φ55 mm ノンコア	(1)H00026.its (2)H00028.its (3)H00029.its (4)H00031.its (5)H00032.its	1 回の削孔ごとにロガーを停止したファイルを保存するようにした。削孔は成功したが、ロガーがフリーズしたらその前に保存が終了していたファイルも破損することが後に判明。
⑩	φ55 mm ノンコア	(1)H00033.its (2)H00034.its (3)H00035.its (4)H00036.its (5)H00037.its	削孔は問題なし。
⑪	φ28 mm ノンコア	(1)H00040.its (2)H00041.its (3)H00043.its (4)H00045.its (5)H00046.its (6)H00047.its	2 本目終了後フリーズ
⑫	φ28 mm ノンコア	(1)H00048.its (2)H00049.its	4 本目途中でフリーズ。⑨～⑫4 本目まではデータ破損。5 本目はデータ OK。

		(3)H00050.its (4)H00051.its (5)H00052.its	
⑬	φ55 mm コア	(1)H00053.its (2)H00054.its H00055.its	1 本目 OK (削孔長 94cm). 2 本目 45 cm 削孔でフリーズ, ファイル名変更して再開するも再びフリーズ. 削孔長 190 cm, ここで削孔終了.
孔 No.	孔条件	ファイル名	備考
⑭	φ55 mm ノンコア	(1)H00001.its (2)H00002.its (3)H00003.its (4)H00004.its (5)H00005.its	データ OK. 回削孔が終わりメモリ保存が終わるごとに USB メモリを坑外へ持って上がり PC へ保存するようにした.
⑮	φ28 mm ノンコア	(1)H00006.its	2 本目でフリーズ, 中止. データは復旧するもデータ列がずれており使用不可.
⑯	φ28 mm ノンコア	(1-2)H00007.its (3-5)H00008.its	2 本目からはビット φ27 mm (28 mm がなくなったため). 27 mm にすると水がつまりやすく何度かロッドの上げ下げをしている. データ OK
⑰	φ55 mm	(1-2)H00009.its (3-5)H00010.its	データ OK

Table 2 Experiment conditions (Adit 20)

Field No. *1	Hole *1	Date	Bit Diameter [mm]	Rod Length [m]	Hole Depth [m]	Number of Pause times *2
12	(1)	1/15	φ27	3.59	2.59	3
	(2)	1/16	φ28	6.15		5
	(3)	1/16	φ28	6.15		5
	(4)	1/16	φ55	5.9	4.9	4
	(5)	1/16	φ28	6.15		5
	(6)	1/16	φ28	6.15		5
	(7)	1/16	φ28	6.15		5
11	(8)	1/16	φ55	5.9	5.25	5
	(9)	1/16	φ28	6.15	5.45	5
	(10)	1/16	φ28	6.15		5
10	(11)	1/16	φ28	6.15		5
	(12)	1/16	φ55	5.9		5
	(13)	1/16	φ28	6.15		5
9	(14)	1/17	φ28	6.15	5.2	5
	(15)	1/17	φ55	5.9		4
	(16)	1/17	φ28	6.15	5.25	5
	(17)	1/17	φ28	6.15	5.4	5
	(18)	1/17	φ55	5.9		5
	(19)	1/17	φ28	6.15		5
8	(20)	1/17	φ28	6.15		5
	(21)	1/17	φ55	5.9		4
	(22)	1/17	φ28	6.15	5.2	5
7	(23)	1/17	φ28	6.15		5
	(24)	1/17	φ55	5.9		4
	(25)	1/17	φ28	6.15		5
6	(26)	1/17	φ28	6.15		5
	(27)	1/17	φ55	5.9	5.15	5
	(28)	1/18	φ28	6.15		5

5	(29)	1/18	φ28	6.15	5.5	5
	(30)	1/18	φ55	5.9	5.15	5
	(31)	1/18	φ28	6.15	5.2	5
	(32)	1/18	φ55 コア	5.87	4.88	4
	(33)	1/18	φ28	6.15		5
	(34)	1/18	φ55	5.9	5.15	4
	(35)	1/18	φ28	6.15		5
4	(36)	1/18	φ55	Failed		
	(37)	1/19	φ55	5.28	5.35	4
	(38)	1/19	φ28	6.15	5.7	5
	(39)	1/19	φ28	6.15		5
3	(40)	1/19	φ28	6.15		5
	(41)	1/19	φ55	5.28	4.68	4
	(42)	1/19	φ28	6.15		5
2	(43)	1/19	φ28	6.15		5
	(44)	1/19	φ55	5.78		4
	(45)	1/19	φ28	6.15	5.2	5
1	(46)	1/19	φ28	6.15		5
	(47)	1/19	φ55	5.78		4
	(48)	1/19	φ28	6.15	5.25	5

*1 Field No. and Hole No. are referred Figure 5.33&5.34

*2 The number of pause times: pausing of data recording when the rods are connected.

参考文献

- 1) The Japanese Geotechnical Society,
http://www.jiban.or.jp/organi/bu/kijyunbu/kouji/200807/JGS_2521_080411.pdf.
- 2) 淀川英司他, ニューラルネットワーク応用, 国際電気通信基礎技術研究所編, オーム社, 1995年.
- 3) 坂和正敏, 田中雅博: ニューロコンピューティング入門, 森北出版株式会社, 1996年10月.
- 4) Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J., Learning Representations by Back-propagating Errors, Nature, Vol. 323(9), pp. 533-536, 1986.