

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360371

研究課題名(和文) 資源開発および地圏開発における不確実性リスクの低減に関する研究

研究課題名(英文) Study on Risk-Reduction in Mineral and Geosphere Development

研究代表者

福井 勝則 (FUKUI, KATSUNORI)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70251361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,300,000円

研究成果の概要(和文)：岩盤物性(一軸圧縮強度，引張強度，掘削体積比エネルギー，摩耗能など)のばらつきは岩盤構造物(鉱山開発，トンネルなど)の設計・施工の際に重要な考慮事項となる。そこで本研究では，ボーリング，さく岩機，ロータリハンマによる，さく孔速度や掘削体積比エネルギーから，岩盤物性の空間的分布を正確に求める手法の開発をおこなった。

研究成果の概要(英文)：Variation of rock properties (uniaxial compressive strength, tensile strength, specific energy, abrasivity etc.) has an important role in designing and constructing the various rock structures (mines and tunnels etc.). In this study, the methods estimating the distribution of rock properties from penetration rate and specific energy calculated with the penetration data (boring, percussive drill and rotary hammer) were developed.

研究分野：工学 地球・資源システム工学

キーワード：岩盤掘削 岩盤強度 掘削比エネルギー さく孔 寸法効果

1. 研究開始当初の背景

岩盤は場所によって岩種が異なるだけでなく、風化、亀裂、断層などによって劣化しているため、資源開発や地表・地下開発を行う際には、その都度、開発場所の地質や岩盤物性の調査が実施される。その際には弾性波速度や一軸圧縮強度などが主な指標として採取され、それを基に岩盤掘削方法の選定や支保設計などがなされる。しかしながら、実際には複雑な地質構造を把握しきれずに開発段階で予想とかなり異なった岩盤が出現し、そのため費用が大幅に増加したり、時間的な損失も生じたりすることが多々ある。このような資源開発および地圏開発における岩盤物性の不確実性に関するリスクを低減することは重要であることは周知のことである。しかしながら、詳細に地質調査を行ってもなかなか岩盤物性を把握することができていないのが現状である。

岩石を破碎して掘削する掘削機械は、いわば強度試験を連続的に、しかも原位置でおこなっているとみなすことができる。そこで全断面トンネル掘進機(TBM)での掘削抵抗から掘削体積比エネルギー(岩盤を掘削するに要したエネルギー/掘削体積)を求め、これから岩盤強度を推定する手法を提案し、その手法を確立した。この手法を用いれば、TBMで掘削中の岩盤強度を把握することができ、これを用いた支保パターンの選定に関する信頼性は向上した。しかしながら、TBMを用いる資源開発および地圏開発は事例として多くはなく、その応用には限りがあった。

2. 研究の目的

本研究では、資源開発および地圏開発における、岩盤物性の不確実性に基づくリスクを低減することを目的として、3種類の掘削機械の掘削データから岩盤物性を把握する手法を確立する。さらに、岩盤物性の不確実性リスクの低減を目指し、岩盤強度の寸法効果やばらつき特性を考慮した手法の確立を目指す。掘削機械のデータから岩盤物性を把握する手法は、TBMを代表として申請者らの得意とする分野であり、国内だけでなく海外においても最先端のノウハウを持っており、研究の成果は世界的にも貢献できるものと考えられる。また、最近の資源不足による新たな鉱山開発や、アジア・アフリカなどの地域におけるインフラ整備で今後ますます岩盤掘削分野は重要となることが予測される背景もあり、この関係の研究は今後重要である。

3. 研究の方法

(1) 機械掘削での岩盤物性の把握

次の3つの手法から岩盤物性を把握する手法を確立する。

・コアボーリング

資源開発では地中の岩石がどのような品位であるかを調べるために必須事項で実施さ

れているが、その掘削データから岩盤物性を把握しようとした研究はみられていない。

・さく岩機

発破用やロックボルト用のさく孔として、資源開発や地圏開発で広く利用されており、これを利用して岩盤物性の把握を行う。

・ロータリハンマ

市販のもので簡易的に原位置での岩盤強度を調べる手法としてシュミットハンマがあるが、岩盤強度が70MPa以上となると測定感度が鈍くなるため、感度のよいものが望まれる。ロータリハンマは水を使用せず、簡易的に穴をあける道具として開発されたもので、これを利用して岩盤物性の把握を行う。

(2) 岩盤強度の寸法効果

岩盤だけにかぎらず、材料は寸法が大きくなると強度が低下する現象がみられる。資源開発や地圏開発では寸法の大きな開発がなされるが、室内試験レベルの大きさ(数cm)の強度と大きく異なっていることが予想されるが、大きな試験片で実験をすることが困難であり、未解決の課題である。申請者らは視点を変え、様々な掘削方法で掘削した場合、寸法を変化させた岩石試験を行っていることと解釈し、様々な掘削方法での掘削体積比エネルギーと掘削ずりの粒度分布の関係を調べることで、寸法効果の影響を検討する。

(3) 岩盤強度のばらつき

岩盤強度は場所によって異なるために、個々の開発場所で求める必要がある。しかし大規模な資源開発や地圏開発ではその開発内でのばらつきも大きく、これの考慮が必要であるが、ほとんど研究がなされていない。掘削機械のデータから大量の岩盤強度が得られるため、その位置的な分布特性を地球統計学の手法を用いて解析することによって距離的・空間的なばらつきを評価することが可能である。その結果を用い、岩盤物性の不確実性リスクの低減を目指す。

(4) ビット摩耗

機械掘削では岩盤を掘削する際に、ビットが摩耗する。ビットの摩耗はビット費用の増大だけでなく、交換する際の時間的損失によって工程を遅らせるため、それによる固定費の増大も大きい。それらがどの程度影響するかを把握する必要がある。

4. 研究成果

(1) 機械掘削での岩盤物性の把握

・コアボーリング

沖縄海域(伊是名海穴)の海底地質構造調査で深海用ボーリング機械によって、100本以上のボーリング孔が掘削された。しかし、コアの採取率が50%程度と低く、地質構造が明らかになっていなかった。そこで、ボーリング掘削中に取得されたデータから掘削体積比エネルギーSE(単位体積の掘削に必要なエネルギー)を求めるために、コアによる一軸圧縮試験なども併用し、掘削データの確からしさを示した後、掘削体積比エネルギー

を地球統計学的手法を用いて空間上で補間して、地質構造を推定した結果を図1に示す。図からわかるように、海底から深度5~6mを境にして、それよりも下部でSEがやや大きくなる傾向が見られた。全体的に層状の構造は見られず、SEの大きい場所や小さい場所が塊状に分布しているように見える。また、海底からの深度が浅いほど、SEが小さい場所がやや多くなる傾向も見られ、地質構造がボーリング結果から把握でき、岩盤物性の不確実性によるリスクの低減ができた。

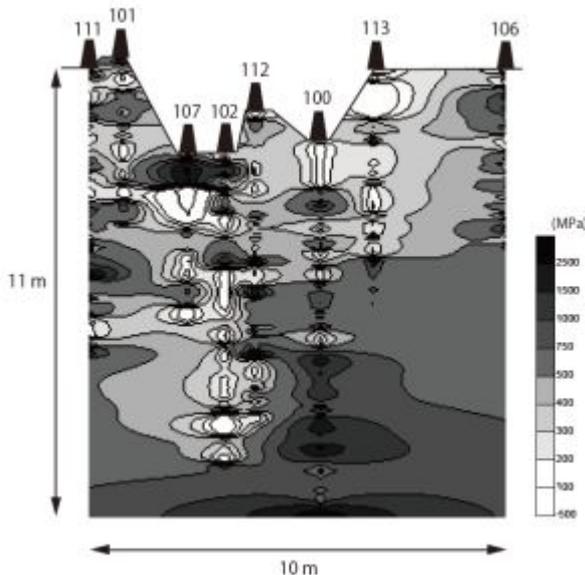


図1 掘削体積比エネルギーの分布

・さく岩機

さく岩機からの岩盤強度の把握に関しては、ビットの貫入抵抗曲線（貫入量と荷重との関係）の傾きが重要となる。そのため、衝撃貫入試験における貫入抵抗曲線の算出方法の検討を行い、精密なモデルを作製することで、図2のように貫入抵抗曲線を求めることを可能として、岩盤評価が可能となった。

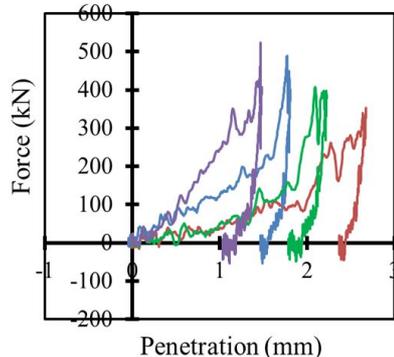


図2 貫入抵抗曲線の例

・ロータリハンマ

図3に示すロータリハンマを用いて、室内を実施した。ハンマの質量は約3kgで、人力で推力を与え、さく孔する形式で、回転と打撃とは連動しており、ビット1回転あたり5回の打撃がなされる。使用したロータリハ

ンマの最大値である、1秒間に20回転（100打撃）として、まず図3に示すようにさく孔実験を行った。

結果の一例を図4に示すが、推力の増加により、さく孔速度が増加する傾向が見られる。図5は一軸圧縮強度の違い（岩石の種類）によるさく孔速度の変化であるが、明瞭にその影響が現れており、さく孔速度から一軸圧縮強度の推定が可能であることがわかる。次に、この装置を改良し、原位置試験を実施し、原位置でも岩盤特性が把握できることを示した。



図3 ロータリハンマでの実験の様子

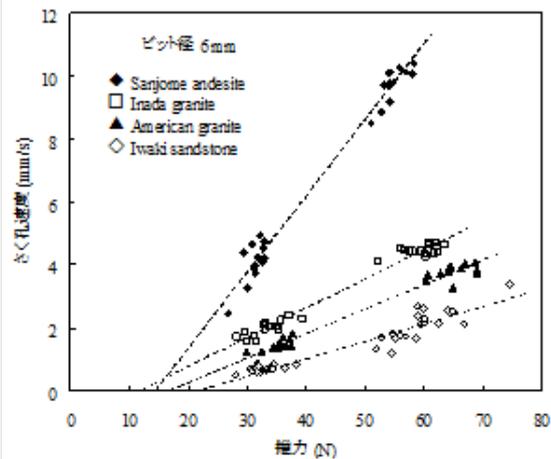


図4 推力によるさく孔速度の変化

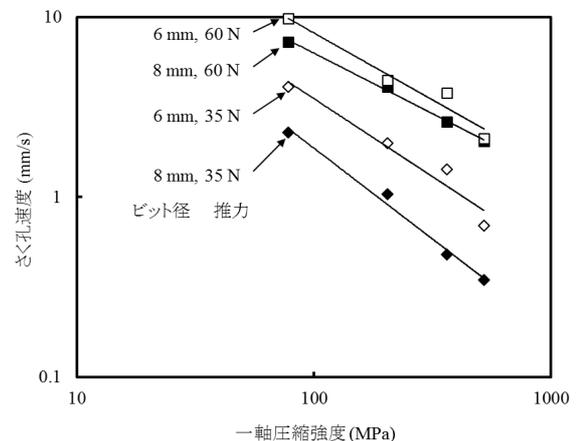


図5 さく孔速度と一軸圧縮強度の関係

(2) 岩盤強度の寸法効果

各種岩盤破碎の方法による、切り込み深さおよび刃物間隔と、ずりの粒度分布の関係を調べた結果、切り込み深さおよび刃物間隔と、ずりの粒径はほぼ比例することがわかった。次に、切り込み深さと刃物間隔の幾何平均と無次元化掘削体積比エネルギーとの関係を調べた結果を図6に示す。これより、岩盤強度が代表寸法の -0.18 乗に比例することがわかった。

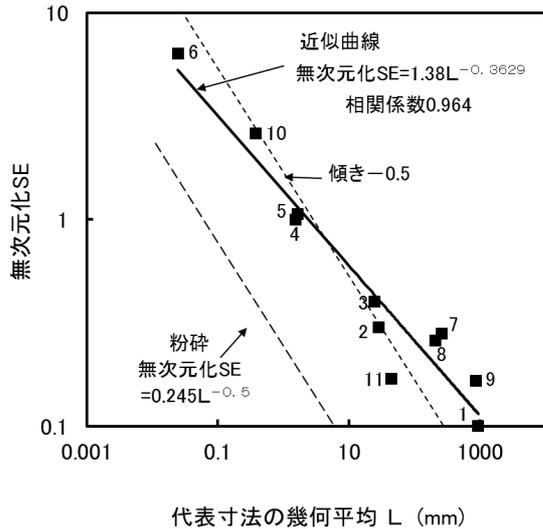


図6 切り込み深さと刃物間隔の幾何平均と無次元化掘削体積比エネルギーとの関係

(3) 岩盤強度のばらつき

図1に沖縄海域での海底岩盤の掘削体積比エネルギーの分布例を示したが、このように、地質構造の変化を、ボーリング結果、さく孔試験結果やロータリハンマ試験結果から把握でき、岩盤物性の不確実性によるリスクの低減できることを示した。また、各種物性値の相互関係を調べ、ばらつきの影響因子を検討した。

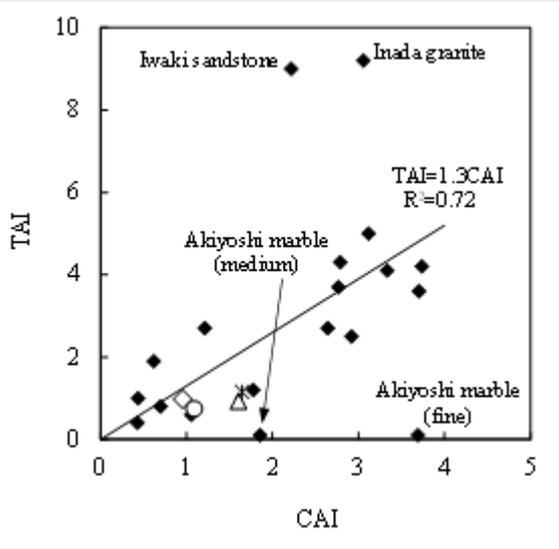


図7 シェルシャル試験結果 CAI と、旋削試験 TAI の関係

(4) ビット摩耗

ビット摩耗を評価する指標として、シェルシャル試験(フランス石炭研究センターで開発され、欧州では標準的な試験法)、旋削試験を実施した。両者の関係を図7に示すが、比例関係はみられるものの、ばらつきがみられた。そのため、両者の摩耗機構を検討し、どのような岩種だとどのような試験をすればよいかの提案をおこなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5件)

- 羽柴 公博, 梁 英宗, 福井 勝則, 小泉 匡弘, 松田 年雄: 衝撃貫入試験における貫入抵抗曲線の算出方法の検討, 資源・素材学会誌, 査読有, 131[No.1], pp.9~16(2015)
- 羽柴 公博, 福井 勝則: 岩石の力学的物性値の相互関係, 骨材資源, 査読有, No.182, pp.64~76(2014)
- 羽柴 公博, 福井 勝則, 杉田 裕, 真田 昌慶: 稚内層珪質泥岩の力学特性, 原子力バックエンド研究, 査読有, Vol.21, No.2, pp.75-81(2014)
- 羽柴 公博, 福井 勝則, 岡本 信行, 水落 幸広: 沖縄海域の海底熱水鉱床の力学特性と地質構造, 材料, 査読有, Vol.63, No.3, pp.244~249(2014)

〔学会発表〕(計 8件)

- K. Hashiba, Y. Z. Liang, K. Fukui and M. Koizumi: Stress Wave Propagation in Rods during Percussive Drilling, the 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014年10月14日~2014年10月16日, ロイトン札幌(北海道札幌市)
- 梁 英宗, 羽柴 公博, 福井 勝則, 小泉 匡弘, 松田 年雄: 打撃さく孔における貫入抵抗曲線の計算方法の検討, 資源・素材学会秋季大会, 2014年9月17日, 熊本大学(熊本県熊本市)
- 羽柴 公博, 福井 勝則, 梁 英宗, 小泉 匡弘: 打撃さく孔の数値シミュレーションにおける課題と今後の展望, 資源・素材学会秋季大会, 2014年9月17日, 熊本大学(熊本県熊本市)
- 張 方圓, 福井 勝則, 羽柴 公博: ロータリハンマを利用した岩盤強度の推定, 資源・素材学会秋季大会, 2014年9月15日, 熊本大学(熊本県熊本市)
- 羽柴 公博, 福井 勝則, 川井 隆宏, 岡本 信行, 水落 幸広, 池尻 健: 沖縄海域の海底岩盤の地質構造と力学特性, 第13回岩の力学国内シンポジウム&第6回日韓ジョイントシンポジウム講演論文集, pp.611-616(2013)
- 水落 幸広, 羽柴 公博, 福井 勝則, 川井 隆宏: 沖縄海域で採取された硫化物の岩盤特性について, 平成24年資

源・素材学会秋季大会講演要旨集, pp.97
~ 98(2012)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福井 勝則 (FUKUI Katsunori)
東京大学・工学系研究科・教授
研究者番号: 7 0 2 5 1 3 6 1

(2) 研究分担者

羽柴 公博 (HASHIBA Kimihiro)
東京大学・工学系研究科・講師
研究者番号: 6 0 4 5 6 1 4 2