

氏 名 : 高本 拓

論文題名 : インドネシアの坑内掘り石炭鉱山開発における基幹坑道の最適設計  
ならびに維持方法に関する研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

インドネシアでは、産出される石炭の99%以上が露天採掘により生産されている。これら露天掘り石炭鉱山の多くでは、剥土比の上昇や環境保護規制の強化に伴う採掘区画の制限等により、生産状況は年々悪化の傾向が表れ始めている。このような状況下で、年々増加する石炭需要を確保するためには坑内掘り石炭鉱山の開発が必要不可欠である。そこで、同国の幾つかの露天掘り石炭鉱山では、その最終残壁や鉱区内の丘部に坑口を設定することによる坑内掘り石炭鉱山の新規開発が図られ、試験的な採掘も実施されている。しかし、インドネシアにおける夾炭層の地山は米国や豪州、欧州と比べて非常に脆弱なため、これまで欧米各国で用いられてきた採掘法および採掘設計では、坑口周辺地山の崩壊や採掘切羽の不安定化等、様々な地山制御問題が発生し安全な採掘が困難であることが予想される。このように、脆弱地山を対象とした採掘システムの開発は、インドネシアの露天掘り石炭鉱山における坑内掘りへの迅速な移行および石炭生産量の確保を可能にする有効な手段として検討すべき課題である。

そこで本研究は、インドネシア特有の脆弱な地山に対して、坑内掘り石炭鉱山を開発する際の最適な基幹坑道の設計および維持方法について、各種室内実験、現場計測および解析により検討したものである。

第1章は緒論であり、インドネシアにおける坑内掘り石炭鉱山開発の意義、インドネシアの坑内掘り石炭鉱山開発の歴史ならびに技術的問題点を述べた後、本研究の目的について述べた。

第2章では、坑内掘り石炭鉱山の設計および開発には、炭層賦存状況をはじめとする詳細な地山条件を把握することが必要不可欠であるため、Gerbang Daya Mandiri (以下、GDM) 炭鉱を研究対象として、近隣に存在する露天掘り鉱山における調査、露頭調査および試錐調査結果をもとに本GDM炭鉱周辺の地質構造、地形条件の特徴ならびに地山の力学的特性などの基礎データを収集するとともに、GDM炭鉱の開発計画の概要について述べた。

第3章では、インドネシアで本格的な機械化坑内掘り石炭鉱山開発を行うにあたり、多くの石炭鉱山で遭遇するであろう脆弱地山での最適な坑口設定方法について検討した。すなわち、過去に採用された開坑方法について考察するとともにGDM炭鉱のケーススタディーを行い、その結果を基に主要な2つの開坑方式であるハイウォール坑口か丘部坑口かの選択、決定方法およびその指針を提案した。また、坑口設定における保安上の最重要課題である坑口安定性評価方法について数値解析を用いて検討を行った。

第4章では、まず、ボーリングコアの調査や地山岩石試験を実施し、GDM炭鉱における基幹坑道周辺地山の詳細な地質構造および力学的特性値を把握するとともに、基幹坑道周辺地山および鋼枠の挙動のテルテールおよびエクステンソメーター等の計測結果から、坑道掘削による地山の変形挙動特性について検討した。その結果、坑道周辺地山が泥岩や粘土岩の場合、砂岩と比べて変位量が非常に大きいことが分かった。また、耐スレーキング試験の結果、試験に供した全ての試料につい

て、スレーキング耐性が弱いことが確認され、坑内湧水、溜水に注意した採掘設計が必要であることを明らかにした。

次に、鋼枠の構造体としての物性値を把握するため、使用鋼材の曲げ試験を実施し、これら得られた地山条件および鋼枠の特性値を用いて、3次元有限差分法解析プログラムFLAC3Dにより現在の坑道採掘深度である深度40mにおける基幹坑道の安定性評価を行い、現支保方式の評価および解析モデルの妥当性の検証を行った。その結果、解析結果がエクステンソメーターの計測値とほぼ一致し、GDM炭鉱での坑道周辺の挙動をシミュレートできることを確認するとともに、GDM 枠の鋼枠曲げ試験の結果から得られたI 型鋼枠の降伏応力値を使用して、鋼枠の安定性を評価できることを確認した。

続いて、本解析手法およびモデルを用いて、今後の基幹坑道の深部化に対応する最適支保方式について検討を行った。土被り100m、200m、300m 毎の坑道周辺地山の破壊領域、変位量分布を解析により求めるとともに、地山と支保の一体化モデルでの計算の結果、鋼枠支保にかかる軸力分布を解析し、坑道支保の安定性評価として鋼枠の降伏強度から枠の安定性を求めた。その結果、土被りが100mより大きくなると、枠間を0.6mにしても現在の支保では坑道の安定性維持が困難であると判断されたため、現在の支保部材よりも大きな降伏応力を有する支保部材を用いるべきであること、ボルト打設の併用が有効であることを明らかにした。

第5章では、GDM 炭鉱で測定した鋼枠の変形、2次支保の打設状況とテルテールおよびエクステンソメーターの計測結果を基に、坑道変形が発生した原因について考察し、軟弱な地山内の基幹坑道維持のため、2次支保打設の要否に関する判定指標および管理基準の策定を行った。その結果、時間の経過に伴い進行する鋼枠の変形、坑道狭小化に対する坑道維持対策として、テルテールおよびエクステンソメーターの計測値から初期最大沈下速度を求め、2次支保の要否を判断する指標としての管理基準を提案した。ここで、初期最大沈下速度とは、計測器を掘進切羽先から5m以内の離隔で設置し、その離隔が40m以内で最も大きな変位速度を持つ期間の直線近似変位速度である。すなわち、この最大沈下速度が、①0~2mm/日の場合には変形の収束が予想されるため通常の観測で対応可能、②3~4mm/日(2日間連続計測)の場合には変位が収束しない恐れもあるため十分注視して観測を行って対応、③5mm/日以上(2日間連続計測)になると変位の進行増大が予測されるために警戒が必要、である。③の場合は速やかに2次支保の打設を検討する必要があるとともに、巻き立て箇所(坑道分岐箇所)としては不適であることを指摘した。

第6章では、露天掘りから坑内掘りに移行する際、ハイウォールあるいは丘部に坑口を設けることになるが、地山が軟弱かつ低土被りの条件下で基幹坑道を掘進、維持しなくてはならず、坑口近くの浅所掘進における地山制御問題ならびにその対策について検討した。すなわち、GDM 炭鉱の坑口近くの土被りが浅い個所での掘進時に発生した沖積層土の掘進切羽への出現、流動性粘土の坑内流入の問題についてその状況と実施した対策について述べ、インドネシアの坑内掘り石炭鉱山において開坑直後にN値が5以下の同様な軟弱土による問題が発生した場合の対策について提案した。すなわち、インドネシアで坑内掘り石炭鉱山開発を行う場合、坑口、坑内骨格構造を設計する際、坑口近くでは事前に計画坑道沿いに5m程度の格子間隔で事前にボーリング調査を行い、流動性の軟弱粘土が坑道上部に存在している箇所は避けるように計画すべきであるが、避けられない場合、または、予測に反して今回経験したような粘土流入が発生、あるいは発生する恐れが出てきた場合、地表からセメントを地山と攪拌しながら注入して地山を改良し、地山強度を3MPa程度以上にまで改良できれば坑道掘進が可能であることを明らかにした。

第7章は結論であり、上述各章を総括したものである。