

学 位 論 文 題 名

Back Analysis of Supported Excavations

（支保を施した空洞の逆解析）

学位論文内容の要旨

トンネルや坑道が変形したり破壊している場合、それらをもたらした地圧が推定されると、安定性の程度が明らかになり、効果的な対策を立てることができる。本研究は地下空洞の変形の計測を基に、地圧を逆解析によって推定する2つの方法を考案し、これらを変状を起こしたトンネルと、長壁切羽の接近により変形・破壊が進行する沿層坑道に適用して有用性を確認したものである。

本論文は全6章から構成されている。

第1章は序論で、本論文の目的と意義、研究の背景について述べている。

第2章は、初期地圧状態の下で開削した空洞が、付加地圧を受けるときの変形・破壊挙動を明らかにするために、モルタル系の材料を用いて行った2次元の物理模型試験について述べている。この時、ライニングとシテスボルトの施された空洞とその周辺岩盤を厚肉円筒として模型化し、支保の効果も併せて調べている。試験においては、非接触型の距離計を用いることにより、空洞壁面の変位に関して、微小な弾性変形から、壁面の剝離を伴う大きな変形に至るまでの推移を連続的に捉えることに成功している。

空洞に支保がない場合、付加地圧が小さい内から空洞周囲のかなりの部分が能動状態になるのに対して、支保が施された場合には、空洞周囲の岩盤に発生する破壊が目視できる程度になるまで、かなりの部分が受動状態に保たれることを明らかにしている。また、厚肉円筒状の支保は、地圧の増大に対し、破壊の初生を遅らせ、内空変位を抑制する上で効果があることを見いだしている。

物理模型試験と並行して、同じ問題に対する2次元弾塑性解析を8節点アイソパラメトリック有限要素法を用いて行っている。岩盤と支保はひずみ軟化を示す弾塑性材料とし、また、破壊条件としてモール・クーロンの式を仮定している。模型試験結果と数値解析結果を比較して、破壊の初生時の地圧と破壊箇所、その後の破壊の進展の様相と空洞の内空変位の挙動などがよい一致

を示すことを確認している。

第3章は、受動抵抗法（Passive Resistance Method）と名付けた逆解析方法について、原理と解析方法を述べるとともに、送毛トンネルへの適用例を示している。この方法は、空洞の一部が受動状態になっており、それに接する岩盤が弾性的に挙動するという仮定の下に、空洞のライニング内のひずみや内空変位の観測結果を用いて、ライニングに作用する地圧を推定するものである。解析領域としてライニングしか必要としないところに本方法の特徴がある。岩盤とライニングの相互作用は、受動状態の空洞壁－ライニング境界において考慮されている。ここでは、ライニングがバネを介して不動点（遠方の岩盤）に固定されるものとしているので、常に安定した解が得られ、この種の解析で問題となる拘束条件の与えた方に合理的な解決が与えられている。また、空洞を有する岩盤の応力解析を基に、正確にバネ剛性を評価する手法を開発している。この剛性は主に岩盤のヤング率に依存し、空洞の形状にはほとんど関係しないことを見いだしている。

逆毛トンネルの事例に本方法を応用し、ライニング内の6つのひずみ計測値と6方向の内空変位の測定値を用いて別々に逆解析を行い、ライニングに作用する地圧についてはほぼ同様の推定結果を得ている。さらに解析結果を基に予想したトンネル壁面の変位は、測量で得られた結果とよく合い、本方法によって変位の評価が可能なことを示している。また、ライニングに作用する地圧が遠方の一様な地圧によってもたらされたものと仮定し、逆解析をしたところ一軸的な応力状態が予想されたが、その作用方向は（コアボーリングや孔内載荷試験から推定した）トンネル周辺に形成された楕円形の緩み域の長軸に一致することを明らかにしている。

第4章は、荷重の比例増加法（Proportional Loading Method）と名付けた逆解析の方法を述べている。長壁切羽の接近に伴う沿層坑道の変形・破壊の解釈と対策に資することを目的に、破壊を考慮しうる逆解析手法の開発を進めている。まず、地圧の増加に伴って生じる内空変位の水平・鉛直成分の比の推移（この線図を現場の特性曲線と呼ぶ）が、水平・鉛直応力成分の比を反映しつつ破壊の進展過程を表現していることを、物理模型試験結果を基に確認している。そして、この特性曲線が、地圧状態の推定、並びに空洞の安定性の指標として使える可能性があることを見いだしている。次に、同一問題に対して弾塑性解析を行い、垂直・水平地圧が比例的に増加するときの内空変位の水平・鉛直成分の比の推移（この線図を予測特性曲線と呼ぶ）を求めている。同一の水平・鉛直応力成分の比に対し、2つの特性曲線はよい一致を示し、特性曲線から、地圧の水平・鉛直応力成分の比を推定しうることを確認している。

本方法を太平洋炭鉱における矩形断面の沿層坑道に対して応用し、長壁切羽の接近に伴って生

じる水平・鉛直地圧の比を推定している。得られた推定は地圧の測定結果と符合しており、また、坑道周囲の破壊の形式と進展状況に関しても、予測と実際の間でよい一致が得られている。

第5章は、第3、4章で示した逆解析法に基づき、空洞の安定性と支保の効果を評価する方法を事例と共に述べている。受動抵抗法を用いた場合、空洞のライニング内の応力分布が求まるので、破壊に対してどの程度の安全率を持っているかが評価できる。この方法を送毛トンネルに適用し、ライニングが破壊に対して十分に安全であることを示している。

荷重の比例増加法を基に、太平洋炭鉱における沿層坑道のボルト支保は、打設部分の岩盤の剛性を約1.9倍高める効果があると推定している。また、塑性域の進展状況に関する比較を基に、ボルト支保は従来の鋼枠支保に比べて坑道天盤の破壊を抑制する上で効果があると推定しているが、これは現場の観察と合致している。

第6章は結論で、本研究で得られた主な結果と今後に残された課題について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 島 洋 二
副 査 教 授 樋 口 澄 志
副 査 教 授 芳 村 仁

本論文は、地下空洞に作用する地圧を逆解析によって推定する2つの方法を研究し、これらを変状を起こしたトンネルと、長壁切羽の接近により変形・破壊が進行した沿層坑道に適用して有用性を確認したもので、全6章から構成されている。

第1章は序論で、本論文の目的と意義、研究の背景について述べている。

第2章では、2次元物理模型試験により、地圧の増加に伴う空洞の変形・破壊の進行状況を明らかにし、併せて支保の効果を調べている。空洞に支保がない場合には、地圧が小さい内から空洞周囲の大部分が能動状態になるのに対し、支保が施された場合には、模型岩盤の破壊が進行した後まで、空洞周囲の多くの部分が受動状態に保たれること、また、支保は地圧の増加に伴い、変位を抑制する上で効果があることを明らかにしている。

物理模型と同一の問題に対し、有限要素法による2次元弾塑性解析を実施して得られた結果は、破壊の初生時の地圧の大きさ、破壊の進展の様相と空洞の内空変位の挙動などに関して、模型試

験結果とよい一致を示している。

第3章では、受動抵抗法（Passive Resistance Method）の名付けた逆解析方法について、原理と解析方法を述べるとともに、送毛トンネルへの適用例を示している。この方法は、一部が受動状態になっている空洞に関して、ライニング内のひずみや内空変位の観測結果を基に、地圧を逆解析するもので、解析領域としてライニングしか必要とせず、また岩盤とライニングの相互作用は、受動状態の空洞壁面において正確に考慮されており、常に安定した解が得られるなど多くの特徴を有している。

本方法を送毛トンネルの事例に応用し、ライニング内のひずみ計測値から逆解析して得たトンネル壁面の変位は、測量で得た結果とよい一致を示している。また、一様な地圧が遠方から作用すると仮定した逆解析により、作用方向がトンネル周辺に形成された楕円形の緩み域の長軸に一致する一軸的な応力状態が予想されたが、これは変状の原因を推測する有力な手がかりを与えている。

第4章では、長壁切羽の沿層坑道を対象に、荷重の比例増加法（Proportional Loading Method）と名付けた破壊を考慮する逆解析手法を開発している。このために、地圧の増加に伴う内空変位の水平・鉛直成分の比の推移（現場の特性曲線）が、水平・鉛直地圧の比を反映しており、地圧状態を推定する手掛かりとなりうることを見いだしている。その上で、同一問題に対し、垂直・水平地圧が比例的に増加するときの内空変位の水平・鉛直成分の比の推移（予測特性曲線）を弾塑性解析で求め、同一の水平・鉛直地圧の比の下では、2つの特性曲線の形が互いによく合い、特性曲線から、水平・鉛直地圧の比が推定しうることを明らかにしている。

太平洋炭鉱における矩形断面の沿層坑道に対して、長壁切羽の接近に伴って生じる地圧の推定に本方法を応用し、水平・鉛直地圧の比に関する推定値が地圧の測定結果と合っていること、また坑道周囲の破壊の形式と進展状況に関しても、予測と実際はよく一致していることを確認している。

第5章では、第3、第4章で示した逆解析法を応用し、空洞の安定性と支保の効果を評価する方法を事例と共に示している。ライニング内の応力が求まり、破壊接近度が評価できる受動抵抗法を送毛トンネルに応用し、ライニングが破壊に対して十分に安全であることを確認している。また、荷重の比例増加法による解析によって、太平洋炭鉱における沿層坑道のボルト支保は、打設部分の岩盤の剛性を約1.9倍高め、坑道天盤の破壊を抑制する上で効果があると推定しているが、これは現場の観察と合致している。

第6章は結論で、本研究で得られた主な結果について述べている。

これを要するに，著者は，資源開発工学ならびに岩石力学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は，博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。