

微重力探査手法を用いた道路トンネルの廃坑処理対策

AN APPLICABILITY OF THE MICRO GRAVITY SURVEY METHOD FOR INVESTIGATING ABANDONED MINES AND RESULTS
OF TUNNEL STABILITY MEASURES FOR ROAD TUNNELS

菊地 弘*, 加藤 ひろし**, 向田 恵三**, 鈴木 雅行***, 武田 茂典****

Hiroshi KIKUCHI, Hiroshi KATOU, Keizou MUKAIDA, Masayuki SUZUKI and Shigenori TAKEDA

This report is describing about the applicability of the Micro Gravity Survey Method for investigating abandoned mines, and about results of adopting tunnel stability measures for the Akita Highway's Sennin Tunnel Project. The tunnel consists of a main tunnel ($L=2,503\text{m}$, $A=87\text{m}^2$) and an evacuation tunnel ($L=2,503\text{m}$, $A=18\text{m}^2$). Geological structure of the tunnels consisted of relatively hard rocks such as hard tuf, andesite, and tuffbreccia.

The NATM short bench cut and the NATM full face method using cut and blast were employed for excavating each tunnel. When the tunnel excavation reached around 580 meters from the entrance, large unexpect cavern emerged after small collapse of the cutting face. As a result of detailed survey, the cavern was proven to be an abandoned mine. The Micro Gravity Survey Method was employed for investigating the cavern because the method was desirable for investigating wide space, and did not require test boring.

Keyword: NATM, micro gravity survey, abandoned mine, road tunnel

1. まえがき

秋田自動車道仙人トンネル東工事は、岩手県北上市で東北自動車道から分岐し地形急峻な奥羽山脈をトンネル、橋梁で越えて秋田県横手市に至るルートのうち、奥羽山脈の入り口に位置する秋田自動車道最長のトンネルである。

当工区は古くから鉱山地帯として知られており、通産省に採掘届出が義務づけられた昭和21年以前に採掘され、明治、大正時代が最盛期であったといわれているが、現在は廃鉱もしくは休鉱しており、詳細資料は皆無に等しい状態であった。本トンネルの計画時点では、東坑口よりT.D. 1,350m地点から現時点の鉱山権が設定されているため、この区間以奥が鉱山の廃坑が出現する可能性があるため要注意区間とされていた。

ところが、T.D. 580m付近の上半切羽掘削中、切羽鏡に若干の崩壊とともに大きな空洞が出現した。詳細調査をした結果、金属鉱山の廃坑であることが判明した。このため、空洞調査方法として、比較的広範囲の調査が可能であり、しかもボーリング等の必要のない微重力探査を実施し、トンネル周辺の空洞を把握し必要な区間の対策工を実施した。

本報告は、トンネル周辺に出現した廃坑の調査方法として採用した微重力探査手法の探査方法および探査結果と、本坑・作業坑のトンネル安定対策のための廃坑空洞処理対策について述べるものである。

* 正員 日本道路公団 仙台建設局 北上工事区
** 正員 (株)間組 北上作業所
*** 正員 工修 (株)間組 土木統括本部 技術・設計第二部
**** 正員 基礎地盤コンサルタンツ (株)関東支社

2. 工事概要

2・1 トンネル概要

仙人トンネル東工事は、道路2車線断面トンネルの本坑（上り線）と作業坑からなり、本坑工期延長L＝2,503m（トンネル全長はL＝3,774m）、A≒87㎡、作業坑L＝3,767m、A≒18㎡である。掘削工法は本坑がNATMショートベンチ工法、作業坑がNATM全断面工法である。掘削方式は両者とも爆破方式を主体としている。

2・2 地形・地質概要

トンネル計画線上の地形は基盤岩の隆起に伴う谷の回春作用により急峻な地形で、V字型およびS字型の谷を形成している。このため平坦地は少なく、和賀川沿いに段丘面が局所的に存在している。

主要地質は凝灰岩、安山岩、凝灰角礫岩、花崗閃緑岩であり、比較的硬質である。今回の廃坑が出現した区間の地質は、新第三紀中新世の大石層の凝灰岩、凝灰角礫岩、変質輝石安山岩が層状に堆積しており、岩片は硬質であるが割れ目が多い状態である。一軸圧縮強度は300～400kgf/cm²が主体である。

廃坑の出現した地点の地質は比較的安定した凝灰岩で、その割れ目には黄鉄鉱、赤鉄鉱、水晶等の鉱物が確認されている。図－1に地質縦断面図を示す。

3. 廃坑の出現と調査方法の検討

3・1 廃坑の出現

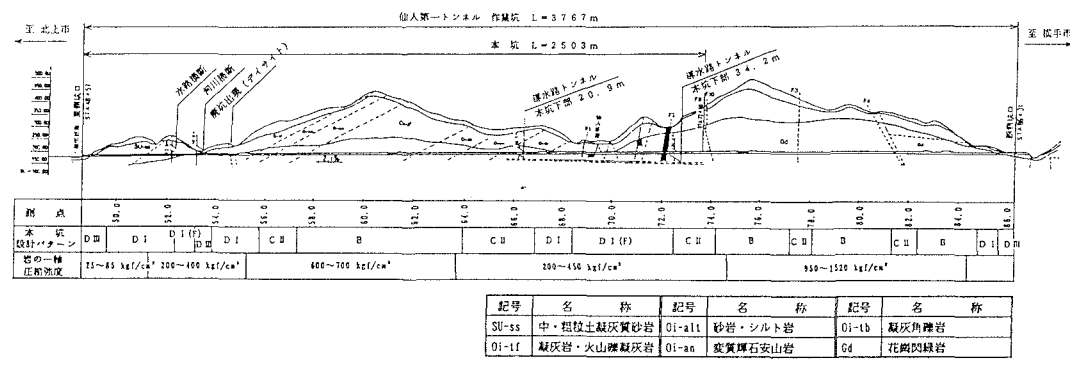
トンネル掘削中、T.D.575m 地点で上半切羽右側に木製支保工で支保された廃坑が出現した。廃坑内の坑壁は比較的安定しており、木製支保工が多少折損している程度であった。（写真－1参照）

トンネル掘削の際にトンネル周辺に出現する空洞は、掘削時に切羽を崩壊させたり、路盤下に出現した場合は墜落など非常に危険な状態となる。また、掘削後のトンネル構造体として、トンネル掘削影響範囲内の空洞は将来のトンネルの安定性を脅かすものとなる。

そこで、廃坑の位置、形状、延長等、本坑および作業坑の周辺を十分把握する意味で詳細な文献調査を行った結果、トンネル周辺に水沢銅山の複数の廃坑があることが判明した。ただし、鉱山の性格上主要な坑道は図面に記入されているが、枝坑についてはほとんど記述されていないという問題点が判明した。



写真－1 鉱山廃坑の出現



図－1 仙人トンネル上り線地質縦断面図

3・2 廃坑の調査方法の検討

切羽に出現した廃坑の主坑道は本坑とほぼ平行して分布しているものと判断されたが、その状況およびそれ以外の廃坑の有無を確認し、トンネル施工への影響および必要な対策工を検討する目的で下記の調査を実施した。

- ① 本坑掘削時に出現した廃坑とロックボルト施工時、削孔水の逸水した部分の再確認をドリルジャンボの削孔を1Dの範囲まで実施した。
- ② 水沢銅山の資料調査を実施したが、閉山が昭和初期と年月が経過しているため、詳細図が見つからず、入手した図面から照合した結果、廃坑の主坑道が本坑と作業坑の下部を横断していることが確認された。しかし、主坑道から鉱脈に沿って掘られた斜坑道は確認できなかった。
- ③ 空洞調査の方法は、地下レーダ、レーリー波探査、弾性波探査、電気探査等が挙げられる。本調査区間のように土被りが100mを越えるような場合には、解析深度あるいは分解能の限界を越え地表からの探査は困難であるため、トンネル坑内から探査でき、作業スペースが小さく、施工サイクルに影響が少なくしかもトンネル断面の上下方向の調査が可能な微重力探査を選定した。探査手法の比較表を表-1に示す。

表-1 廃坑探査手法の比較表

探査手法	探査原理等	概略調査法	特徴	探査能力	その他	評価
弾性波探査 (屈折法)	地層境界で屈折を繰り返しながら、伝播する弾性波の伝播速度を測定する。	路線を測定し、測線上に地震計を配置する。路線に沿って数箇所起震し、それぞれ地震計で観測する。	測線長は探査震度の5倍程度である。起震は主に火薬を使用する。弾性波速度は深部ほど早くならない。断層は低速度帯として捕らえられる。速度値は岩の工学的性質の判定に有利である。	測線長と起震力に関係するが、現実的には最大200mである。局所的な異常は検出できない。	市街地では使用できない。分解能は低い。	△
電気探査	地下に電流を流し、地下の比抵抗分布を測定する。	測点を設定し、測線上に4本の電極を設置する。この電極の内、2本の電極に電流を流し他の2本で電位を測定する。電極の間隔を広げることで探査深度を増やす。	水分の分布状況に敏感に反応する反面、電極を設置する地点の乾燥状況、接地抵抗の影響を受けやすい。深部の精度は浅い部分より数段低下する。作業性は良い。	数mの異常を検出できるのは深度30m程度まで。深部ほど分解能が低下する。	地表面付近は湿度の影響が大きい。解析理論上、浅部の誤差が深部に集中する。	○
重力探査 (微重力探査)	地下の密度分布の不均一性による重力の変化を測定する。	測定点に重力計を接地して、重力計の機械高、測定時刻とともに重力値を測定する。測定点を移動して測定を繰り返す。	調査は無騒音で現況を乱さない。地盤振動の影響を受ける。密度の相違があれば解析できるが地層が異なっても密度が類似したものであれば、解析が難しい。地形が急峻である場合、地形の影響を受ける。	探査深度は目的に応じて任意に設定が可能である。従来に方法では分解能は比較的低いが、解析手法の開発によって分解能を向上させた。	1回の測定データから何回でも繰り返し解析が可能である。	◎

4. 微重力探査手法について

4・1 微重力探査手法の概要

微重力探査手法とは、「2つの物体はそれぞれ物体の質量の積に比例し、距離の2乗に反比例する引力を及ぼしあう」という万有引力の法則を利用したものであり、重力計内部の振子の質量と地盤の密度との関係により計測地点の重力を把握し地盤の密度を測定できるものである。

地山内に空洞があった場合には重力がわずかに減少することと、重力の減少度合いにより深さ方向の把握も可能なため、これらの挙動を精度良く探査し解析することで空洞の位置や規模を推定する方法である。図-2に微重力探査計模式図を、図-3に深度別重力異常測定概念図を示す。

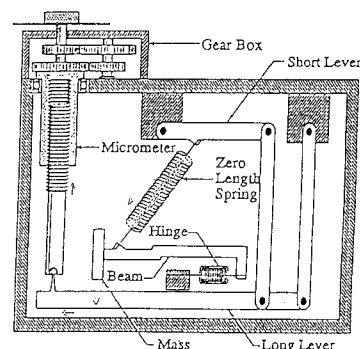
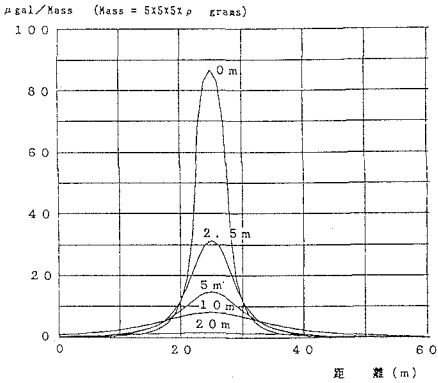


図-2 微重力計内部模式図

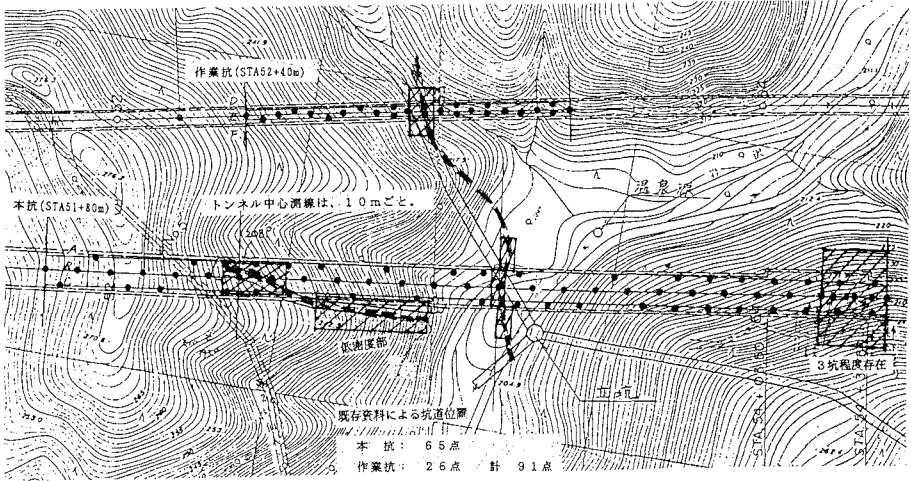
なお、探査に用いた微重力計は、現在最も高感度でかつ安定性に優れているといわれる米国 LaCOSTE & ROMBERG社製の可搬型重力計 LaCOSTE MODEL-D(D-158)を用いた。

4・2 廃坑の調査

探査区間として、廃坑の深度および延長を確認するため、水沢銅山の概要図から、本坑 260m 区間、作業坑 100m 区間を設定した。測線は本坑、作業坑ともトンネル中心、および両端の3測線で計画した。測点はトンネル中心では10mピッチ、両側で20mピッチの千鳥配置とし、重力の急変する箇所がある場合、解析精度を向上させる目的で測点を追加した。測線配置平面図を図－4に、測線諸元を表－2に示す。



図－3 深度別重力異常測定概念図



図－4 微重力探査測線配置平面図

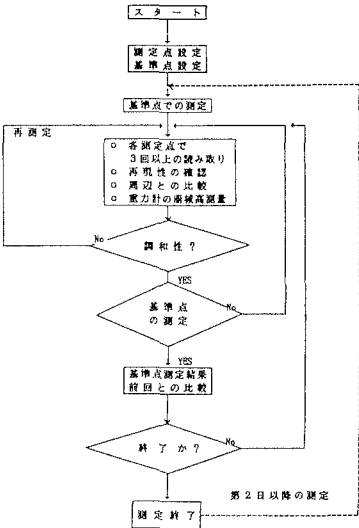
表－2 微重力探査測線諸元

調査位置	測線名	測線長 (m)	測点数
本 坑	測線A	260	65
	測線B	260	
	測線C	260	
作業 坑	測線D	100	26
	測線E	100	
	測線F	100	
合 計	6測線	1080	91

4・3 微重力探査の測定方法と解析

微重力の測定にあたっては測定精度を十分確保するために、図－5に示す測定フローに従って測定した。

地盤内の密度を解析するために、図－6に示す解析モデルを設定した。解析モデルは上方がトンネル上半盤（作業坑では底盤）より上部へ50m、下方が50mの範囲とした。また、左右の領域はトンネル中心より左右に 1.5Dの範囲とした。各ブロックはトンネル軸に2.5m、深さ方向に2.5m,およびトンネル直角方向には本坑10m、作業坑 5mの



図－5 微重力探査測定フロー

大きさとした。

測定後の解析および作図までのフローを図-7に示す。

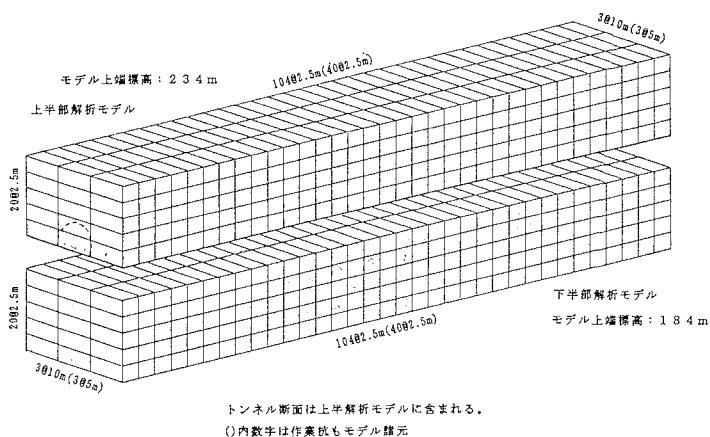


図-6 解析モデル概念図

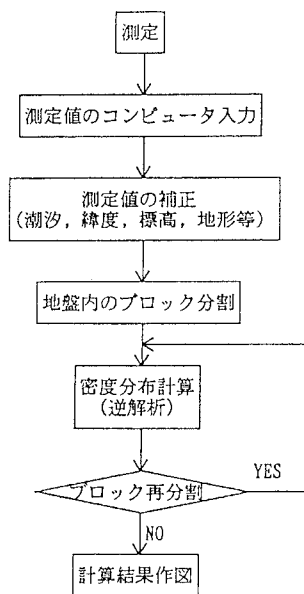


図-7 測定後の解析フロー

4・4 廃坑の調査結果

微重力探査によって判明した空洞位置について、本坑から主要な位置にさぐりボーリングを行った。その結果、廃坑探査位置との精度は1 m程度の誤差で探査でき、十分適用できる手法であることがわかった。本坑中心位置での解析結果の密度分布図を図-8に、密度分布より判明した廃坑位置の平面図を図-9に示す。

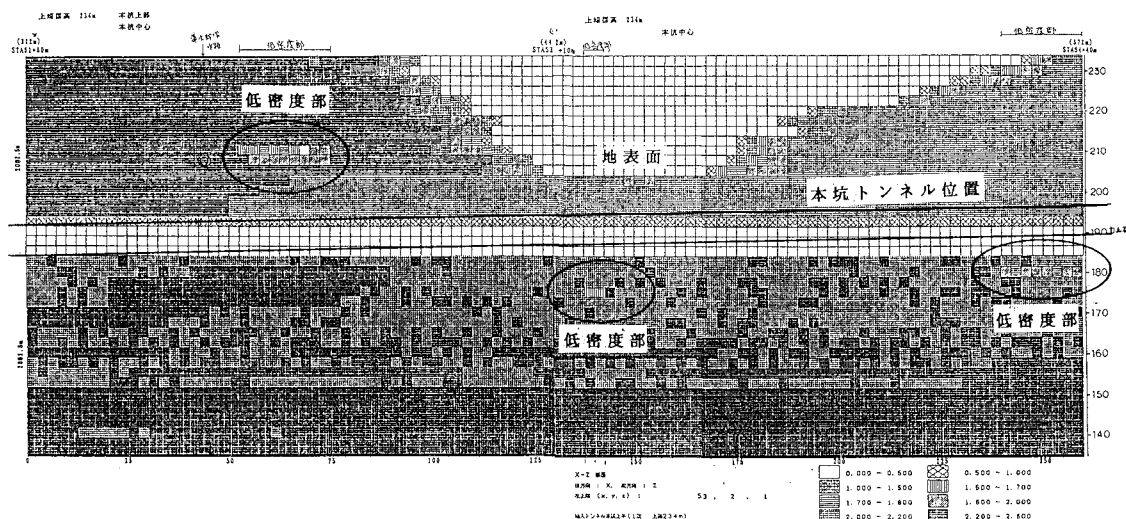


図-8 本坑中心位置での解析結果の密度分布図 (STA.51+80~54+40)

5. 廃坑の処理

廃坑対策としては、ウレタンとエアミルクにより空洞充填を実施し、廃坑の空洞安定性の確保と本坑および作業坑の構造上の安定性確保を図った。このとき、充填対象範囲としては、廃坑の断面が約2 m程度であることから、アーチ形成ゾーンを考慮してトンネル周辺5 m以内に廃坑があるものを充填した。図-10に空洞充填に先立ち不要区間へのリーク防止用ストップ注入要領断面図を、図-11に本坑下部の廃坑充填対策断

面図を示す。

なお、廃坑区間のT.D.564m地点の本坑において内空変位測定、天端沈下測定、ロックボルトの軸力測定および地中変位測定を実施しているが、特に異常値は発生しておらずトンネル構造への影響は少ないといえる。

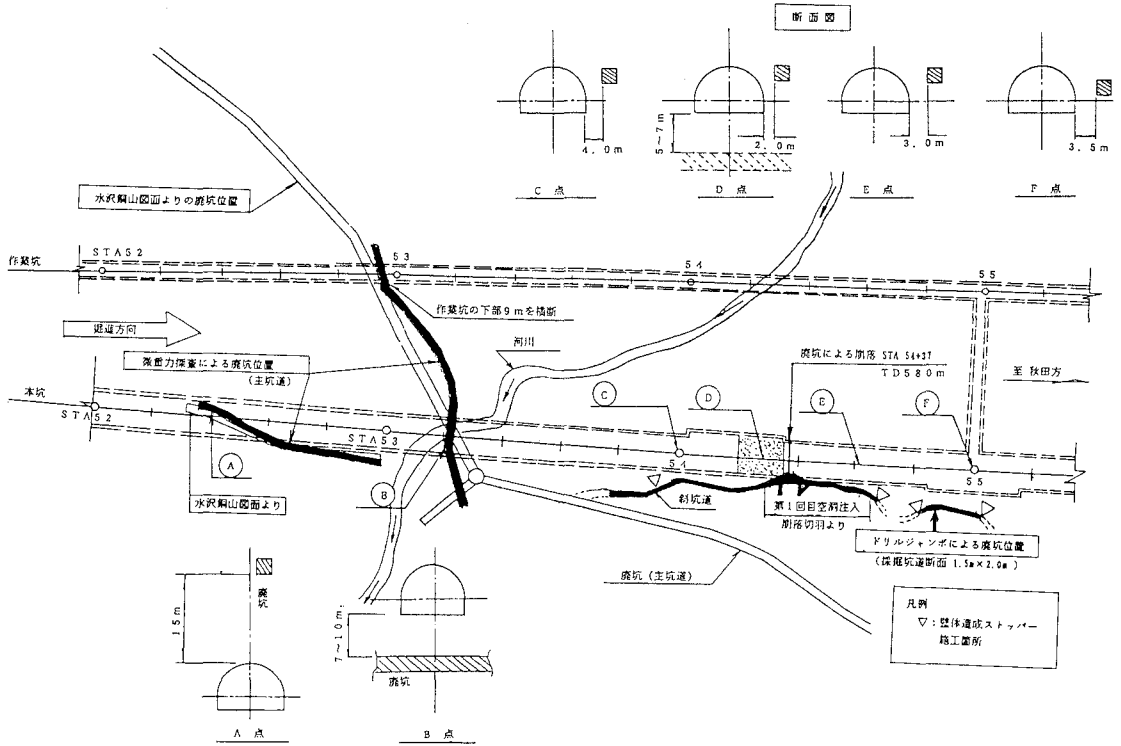


図-9 密度分布より判明した廃坑位置図

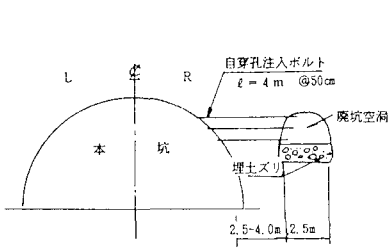


図-10 リーク防止用ストッパ注入要領断面図

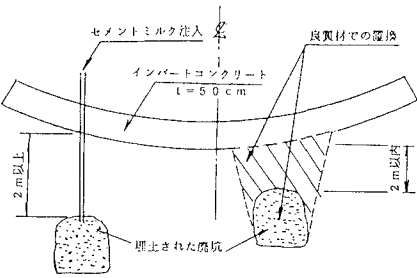


図-11 本坑下部の廃坑充填対策断面図

6. おわりに

トンネル坑内に出現した廃坑の調査手法として、微重力探査手法を用いて広範囲のトンネル周辺の廃坑の調査を実施し概略の位置を確認後、詳細な位置確認のためのボーリングを実施し確認した。調査結果としては廃坑の位置を比較的精度良く確認することができ、必要な対策工を施工することができた。

今後、このようにトンネル坑内に出現する廃坑の調査にあたって本手法は十分適用性があるため、有効な活用と、さらに探査結果および解析精度の向上について検討していきたいと考えている。

なお、微重力探査の実施、解析および廃坑処理に対してご協力をいただいた(株)間組佐々木照夫氏、井上賢一氏、基礎地盤コンサルタンツ(株)関谷堅二氏、梅内勝彦氏に深甚なる謝意を表する次第である。