

現地調査による採石地下空間の構造安定性に関する考察

—大谷石採掘跡地空間について—

CONSIDERATION OF STRUCTURAL STABILITY OF UNDERGROUND QUARRY: THROUGH FIELD INVESTIGATION AT OYA

清木隆文・江守太郎・アイダン オメル...

Takafumi SEIKI, Taiichirou EMORI and Ömer AYDAN

There are many underground quarries for Oya stone or Oya tuff in Oya area, Utsunomiya City, Tochigi Prefecture, Japan. Some of them have quarried Oya tuff. Although the regulation has been opened for classification of the stability level of the underground quarries, it could not control and progress the redevelopment in Oya area. In this paper, the authors investigate the mechanical stability from the rock mechanical view point through the field measurements and the stability analyses by the rock mass classifications at a underground quarry. The field measurements contain the displace measurement, the simple elastic wave propagation test for crack depth estimation, the elastic wave velocity test for the estimation of loose zone depth. Based on these results, the authors accumulate the tendency of underground space stability just after quarrying Oya tuff and the minimum structural long life of the underground quarry without supporting systems.

1. はじめに

地下空間の有効利用を行うためには，その建設費用が地上部の同等な施設に比べて高額になることは否めない。しかしながら，既存の地下空間(既存地下空間[採鉱，採石などを行った結果，2次的に生み出された地下空間])を目的に合わせて構造のリフォームを行うことで，その工費を抑えることができる。このためには，経済的な裏づけを必要とするため，交通の利便性等，立地がある程度良い事が必要とされるだけでなく，構造的に安定性の照査が必要である。現在まで，大谷地域の採石(跡)地下空間(地下採掘場)の安定性に関する評価手法が提案されてきた¹⁾が，これをもとにした埋め戻しや再開発は実施に至っていない。今までに公表された採石地下空間の構造安定性の評価手法は，大谷地域全体の安全性評価の基準となる。しかしながら，実際に大谷石採石地下空間を空間資源として有効利用を図る際には，個別の採石地下空間を岩盤構造物の視点から，安定性を評価する必要がある。そこで著者らは，大谷地域(栃木県宇都宮市大谷町)にある大谷石採石地下空間を具体例として，現場調査や岩盤分類に基づく判定手法²⁾に基づき，岩盤の構造安定性について基礎的な考察を実施する。

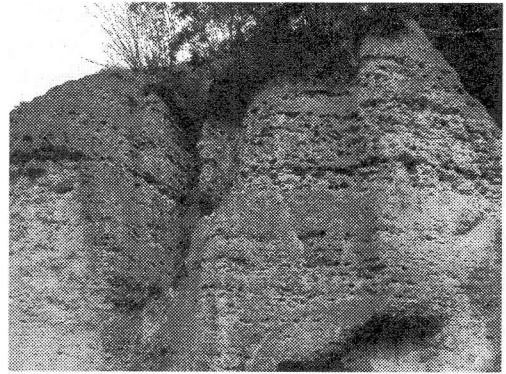
2. 大谷地域の現状および特色

2.1 大谷石の地質的特性¹⁾

キーワード：採石地下空間，構造的安定性評価，現場調査

* 正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科建設工学コース
** 工学士 浅沼組(元 宇都宮大学学生)
*** 正会員 工博 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科

大谷石は、栃木県宇都宮市の中心より北西約10kmに位置する大谷町を中心に、新第三紀頃（約2,000万年前）に形成された代表的な熔結凝灰岩であり、今から1,500万年以上前に海底火山の激しい噴火活動のもと火山噴出物（火山灰や岩片）が繰り返し海底に堆積して、現在のような厚い層を形成し、陸地となるころには、緑色凝灰岩（グリーンタフ）に変化していった。この層を構成する岩は、膠結組織・気泡組織の発達した層理のない岩体をなす流紋岩質を呈する。この層は基盤層（流紋岩類、チャート、砂岩など）の上に東西約8km南北約37kmにわたって分布し、厚いところで200～300mの層厚を持っている。東西に約2km、南北に約4kmにわたり、淡緑色凝灰岩が所々に露頭している。採掘区域は東西に約3km、南北に約6kmに及んでいる。用途として、住宅の擁壁材や壁材、建物の化粧板など



図一1 大谷石の「通り」(写真中水平方向につづく凸凹の並びが「通り」である)

広く使われる。大谷石の品質は、「ミソ」と呼ばれる粘土鉱物等の不純物を伴う空隙の密集度合いに依存している「通り」(図一1)と呼ばれる部分の多少によって決まる。すなわち「ミソ」の集中している部分は石材としての品質はあまり良くないので、「通り」を避けて、できるだけ良質な石材を切り出すこととなる。特に、「ミソ」の含有の少ないものから多い大谷石を細目、荒目一級、荒目二級などと分類して呼ぶ。大谷石の走向・傾斜は「ミソ」の方向をもとに記すと、東部で、N30°～50°E、4～6°E、断層の西側ではN18°～23°E、10～8°Eである。大谷層は上部層、中部層、下部層、最下部層に分けられ、傾斜のゆるい断層部で中層部に接し、上層部の下部は「通り」が無く最も良質な石材である。この地域から産出される大谷石は、荒目石、細目石、田下石、桜田石の4種類に大別される。荒目と細目の間に「中目」を設け、3段階で石材としての区分も行われる。細目は大谷層の上部層の下・中位から採られ、荒目は中部層の上位から中位に分布している。細目と同様の内部構造を持ち、白色を呈した石材「白目」も一部で産する。田下石、桜田石は下部層の「ミソ」を含まない細粒凝灰岩を指す。これらの名前は採掘する字名に由来する。地下水位は地表から概して10m以浅と比較的浅いことが特徴である。

2.2 大谷石の利用・地下採石の歴史¹⁾

大谷石は、古くから建材として使われてきた。今から約1万年前(縄文の創生期)から2千年前の弥生時代までの約8千年にわたり、人間の住居でもあり、墓所として使われることもあった。天然斜面の半洞窟(オーバーハングした窪み)は風雨をしのぐのに最良の場所であった。これは、半洞窟状の斜面の脚部から日本最古と言われた土器が発見され、またこの位置よりも上部層からは年代順に土器および土器片が出土していることから裏付けられる。また埋葬された人骨も発見されている。弥生時代になると、農耕に適した台地へと生活の場は移動したが、古墳時代になると、大谷石を採掘して古墳の石棺や石室を作り始めた。大谷石が石材として使われたこの頃が初期である。平安時代から鎌倉時代初期にかけては、オーバーハングした半洞窟状の天然斜面に多くの仏像が彫られ、山岳仏教の霊場となった。これは現在の大谷寺境内にあり大谷磨窟仏と呼ばれ、特別史跡、重要文化財に制定されている。約1150年前には栃木県内の国分寺建設のために土台や石垣用に大谷石が採掘された経緯がある。近代では、旧帝国ホテルに大谷石利用され、関東大震災に耐えたことにより、全国的に大谷石の名が知られることとなった。第二次世界大戦時には、採石に伴ってできた採掘地下空洞が軍需工場として使われていたため、採掘は殆ど行われていなかった。現在では、良質な石材を切り出す作業に伴って派生した多数の大きな空洞が地下に残っている。1960年代に手堀から機械堀が主流となり、生産効率もかなり改善されたが、1973年の売上をピーク(年間生産高98億円：石材業者数118)に、産業の斜陽化

がすすんでいる。石材の採掘方法は、地質構造に依存し、良質な大谷石がどの深さにあるかによって決まる。この地区は大谷石(流紋岩質角礫凝灰岩)を主に地下 30 m 以深から産出した結果として、地下空間を擁している。近年、この大谷石の産出量も減少の一途にあり、安全性を確保するために採石地下空間を埋め戻すことなどが検討されている。

3. 大谷石の採石地下空間の掘削基準・安全性について

3.1 大谷石の掘削基準をもとにした地下採石手順について

明治年間には露天採掘が主流¹⁾であったが、大正年間からは坑内採掘によって石材が切り出された。その結果として地下空間が作られることとなった。地下採石方法は大きく「平場掘り」(地上、あるいは、ある深さから掘り下げながら採掘する方法)と「垣根掘り」(横坑を使って掘り進み、横方向に石材を掘り進む手法)と分類される。これらを組み合わせた手法が「坑内掘り」である¹⁾。地上から掘り下げる平場掘り「露天掘り」は、垣根掘りに比べてコストは安い。が、「垣根掘り」は、浅層にある質の悪い石材を掘り出すことなく、深部の上質な石材を切り出せるので、垣根掘りの方の採算性が良い。昭和 31 年の大谷石材安全協議会が定めた採掘基準に基づき、残柱の大きさ、間隔などが決定されてきた。東京通産局による指針に伴い、大谷石を掘削する際には、残柱式採石法を採用している。これは、残柱が地圧の大部分を支えるとした工法であり、大谷採石技術の指針²⁾の範疇において、どの程度の大きさに残柱の間隔を

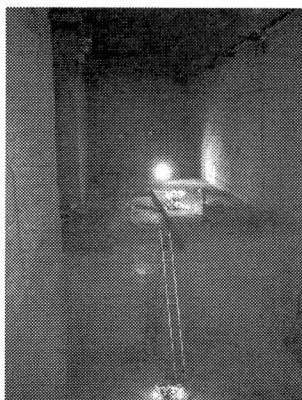


図-2 大谷石採石地下空間内の採石部(測線 B-B' の一端 B 点付近から、測線 A-A' の A' 点方向を臨む)

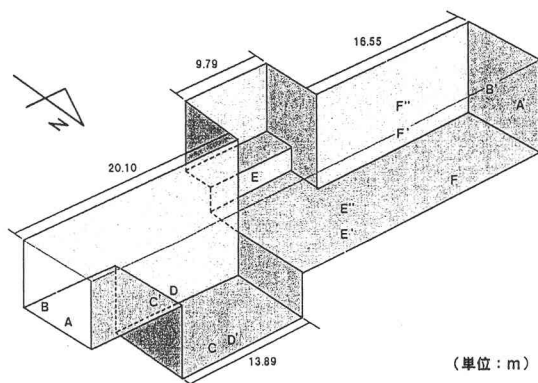


図-3 採石地下空間の測定位置の簡易図

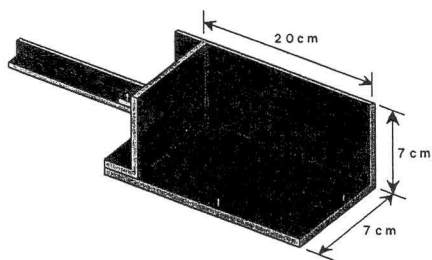


図-4 レーザー変位計固定治具図

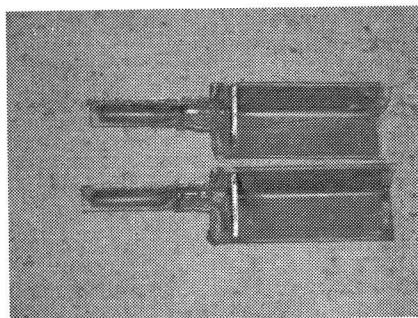


図-5 固定用機材完成図

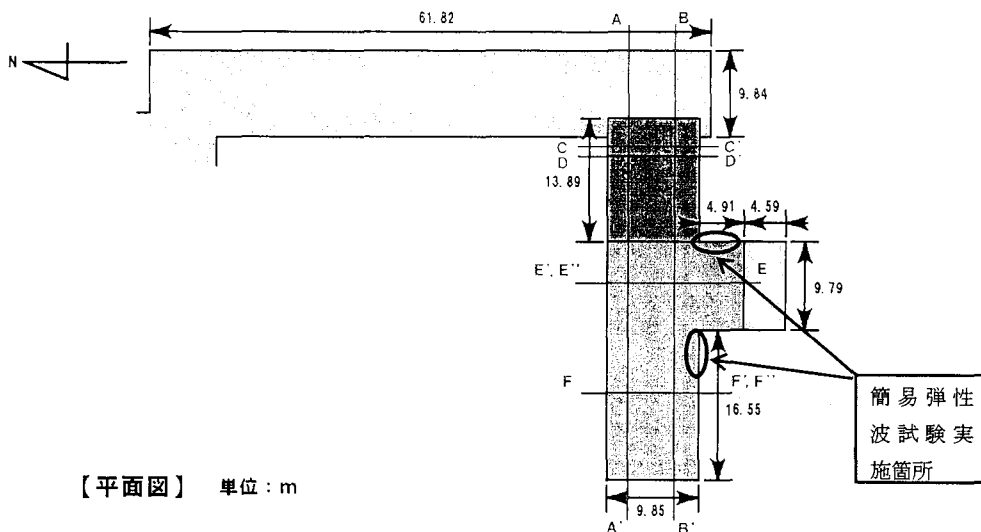


図-6 測定箇所平面図および簡易弾性波試験実施場所

設定するかは、残存空間を如何に安全に維持するかに強く関係するとともに、採算性に大きく絡んでくる。その残柱の大きさは、荒目で4間以上(1間=1.818m)、細目で5間以上とされている。また、残柱の間隔は荒目、細目ともに、千鳥(ジグザグ)配置で10間以内、通常配置で6間以内とされている。

3.2 大谷石の採石地下空間の安全性評価について

大谷石の力学特性を把握し、地下空洞陥没のメカニズムを検証する研究は、今までにも数多く実施されてきた。近年では、平成13年9月に栃木県より出された「大谷石採取場跡地安定度評価」³⁾において、原則として採石場ごとを344のブロックに分け、それぞれ採石地下空間の安定度をA(安定度が高い)～D(安定度が低い)と評価した結果が示されている。しかし、残念ながら安定度が低いとする評価Dの箇所が344ブロック中92ブロックという結果となった。安定度が低い採石場跡が多く把握されているにもかかわらず、埋め戻しなどによる解決が進まないというのが現状であり、大きな課題である。現在、構造特区の申請などにより、この状態の打開が図られている。

4. 大谷石の採石地下空間の調査について

4.1 調査対象の採石地下空間

本研究では、大谷採石地下空間の安全性の検討を行なうため、大谷町で大谷石の採掘を行なっている石材会社に協力を依頼し、大谷石の採石箇所において調査を行っている。図-2に、本研究で研究対象とした採石地下空間の空洞内の写真を示す。また、図-3に概略図を示す。この採石地下空間の天端までの土被りが38mの空洞で、大谷地域の中では比較的浅い地下採石場である。この採石地下空間は幾つかの採石跡地下空間に隣接する空洞の一つである。立坑から階段で地下採石場の跡地に達するが、その部分は採石後30年以上経過して今なお健全である。本研究で対象とする採石地下空間からは、荒目石あるいは中目石といわれる大谷石の中でも比較的剛で丈夫な石材を産出する。

4.2 大谷採石地下空間の変位測定

実際に掘削が行われている空洞が、採石が進行するに伴って発生する経時変位を確認するために、ここでは内空変

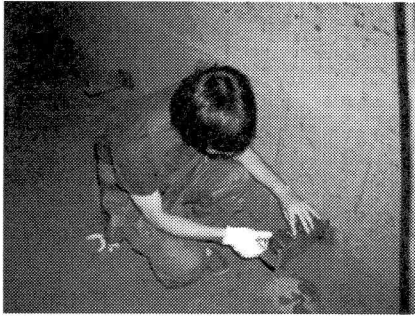


図-7 変位測定状況(A-A'測線)

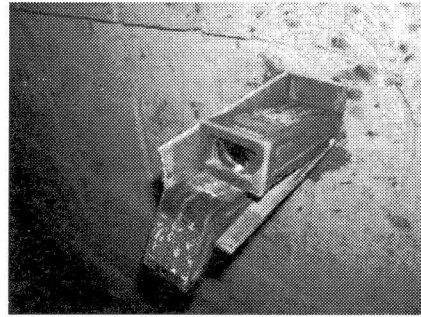


図-8 角度補正用固定具の固定状況

位の測定を実施した。計測には、レーザー距離測定器(DISTO pro4a hand-held laser meter)を用いた。測定器の測定精度は $\pm 1.5\text{mm}$ である。レーザー光によって対象物間の距離を測定するので、測定対象部の足場が必要ないので、採石作業の障害とならず、少人数で高精度の測定が可能となる。実際に、変位の測定を行なうにあたり、複数回の測定において、採石の作業の障害とならないように、取り外し可能な測定器によって全く同じ測線を計測する必要があった。そこで、様々な固定用器材を工夫し、それを用いて測定を行なった。まずは、三脚を使った光波測距を試みた。これは、坑内の地面にコンクリート釘を打って基準点とし、下げ振りをを用いてその基準点に機材の固定点を合わせ、光波による測量を行なうことを目的とした。しかしながら、凹凸が多い採石場の中で、採石により基準点の移動が余儀なくされ、固定点を坑内の地面には設定しにくいことから、本研究では採用しなかった。その他、このDISTO レーザー距離測定器を用いて、固定治具にコンボジットパネルを用いたりしたが、採石地下空間の側壁などを傷つけることなく、基準点をしっかりと固定し、採石作業の邪魔にならない場所にレーザー距離測定器をしっかりと固定することができなかった。そこで、L字型鋼材を用いて測定器を固定するための治具を作成した(図-4、図-5)。寸法は幅約7cm、長さ約40cmである。そして、採石地下空間の採石に影響を及ぼさない壁面にドリルで穿孔し、直径4cmの孔を設け、固定治具の棒部を孔に差し込み、水平位置を水準器で確認し、セメントモルタルで隙間を埋め、この固定治具を固定した。この固定治具を測定起点として、採石地下空間の内空に、水平変位を計るために、A-A'からF-F'と6本と測線E-E', F-F'と始点を同じくして、斜め上方向の変位を測定する測線E-E'', F-F''の合計、8本設定した(図-6)。例えば、測線A-A'の場合、レーザー距離測定器を測点Aに固定治具で固定し、他方の測点A'にレーザー光をあてて、測定した。各測線の測定は、固定治具に測定器具を図-7のように据え付けて実施した。平面図(図-6)における測線A-A', B-B'は50m近い距離を有するため、測定する壁面にプラスチック板を設置し、測定器が発するレーザー光が反射しやすいように配慮した。また、E-E', F-F'測線の同始点E点、F点で設定する測線E-E'', F-F''は、取り外しのできる十分剛な硬質ゴム製の固定具(図-8)を用いて、レーザー距離測定器を固定治具上にある角度をもって斜めに設置し、壁面間の水平変位だけでなく、斜め方向の変位の測定も実施した。なお、測定は可能な限り人為的誤差を小さくするように注意し、一つの測線についてレーザー距離測定器を固定治具に置きなおしながら、各測線5回ずつの変位を測定した。該当する測線の距離は、測定で得られた値の平均値とした。

4.3 内空変位の測定結果と考察

測定変位、測定データの相対誤差と経過時間との関係図を図-9から図-16に示す。ここに、相対誤差とは、同じ日に測定した測定値の期待値と偏差の比である。またデータの精度は、レーザー距離測定器の測定精度と相対誤差とを比較することで議論する。採石量は、需要に応じて変化するので不規則である。本論文で示した期間(126日間)では、1日平均 6.3m^3 、切り出しブロック(40cm×30cm×90cm)を58本切り出していたが、最高で 21.3m^3 を切り出した日も見られた。前日に切り出した大谷石の搬出のみを行う日もあるため、採石量がゼロの場合もあるが、今回観測された変位は、日々の採石に伴って現れている。本研究で対象とした採石地下空間は、測定開始時の距離を変位初期

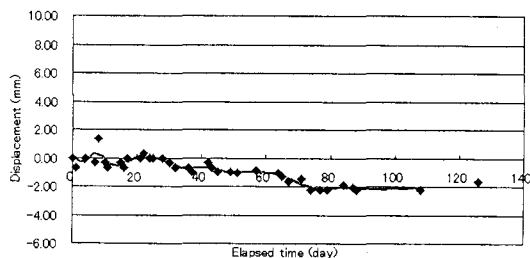


図-9 測線 A-A'の変位

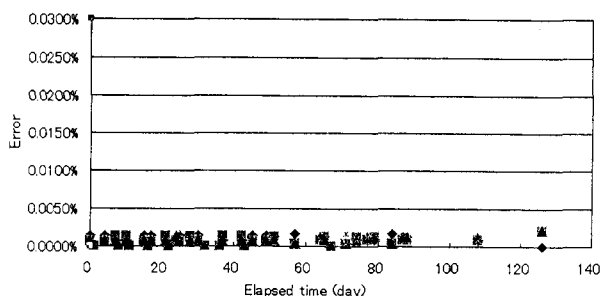


図-10 測線 A-A'の測定精度の推移

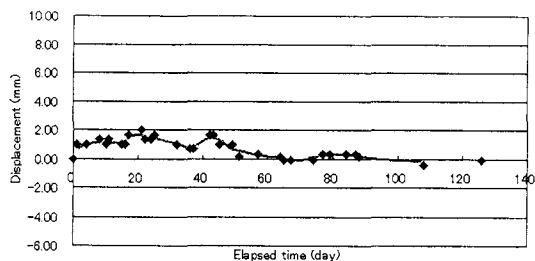


図-11 測線 D-D'の変位

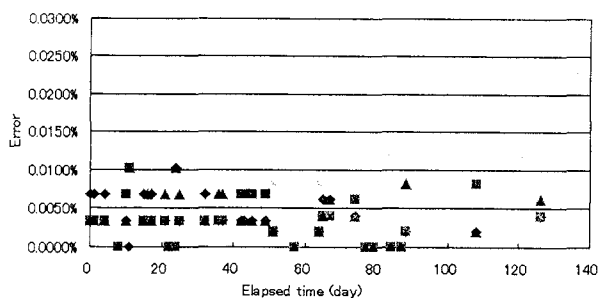


図-12 測線 D-D'の測定精度の推移

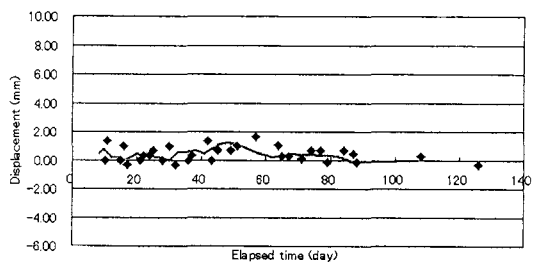


図-13 測線 E-E'の変位

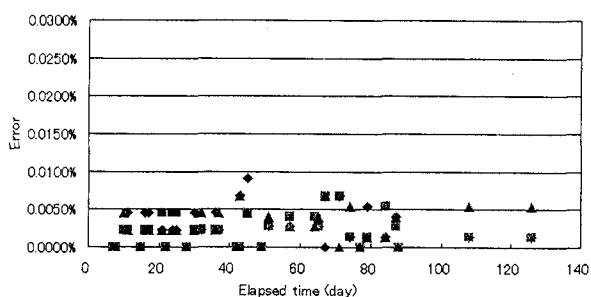


図-14 測線 E-E'の測定精度の推移

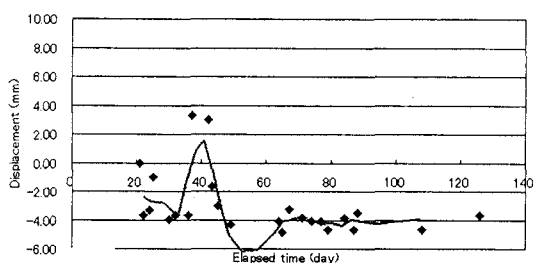


図-15 測線 E-E''の変位

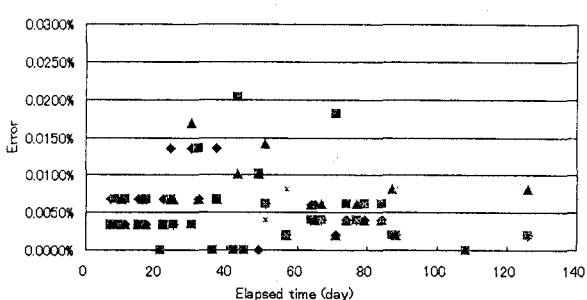


図-16 測線 E-E''の偏差の相対誤差

値 0 とし、これ以降の距離測定値の差を変位として計測する。以下に、採石地下空間の空洞軸である測線 A-A'、採石地下空間の中でも現在採石を実施していない部分の断面の測線 D-D'、採石を実施している部分の測線 E-E'および測線 E-E'における斜め上方向の測線 E-E''の変位を示し、誤差の検討などの考察を記す。ここで、変位と時間経過との関係を示すグラフにおいては、それぞれの前後 3 測定点において平滑化を実施し、3 点の平均により曲線を描

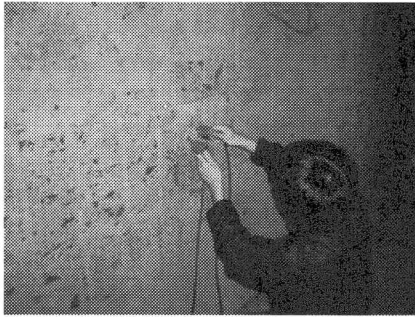


図-17 簡易弾性波探査試験

いた。また、偏差の相対誤差のグラフにおいては、1回目から5回目までの偏差の相対誤差をすべて記載してある。1回目の偏差の相対誤差から5回目の偏差の相対誤差まで、それぞれ◆, ■, ▲, ●, ◇の順でプロットした。レーザー距離測定器の測定結果は、トータルステーション(TOPCON AP-L1, 測角5"読み)により確認した。その結果、測線長さが精度良く測定できていることを確認した。ただし、2つの機器による測定結果の差は、トータルステーションの反射プリズムを設置する関係で、レーザー距離測定器のための固定治具の中ほどから、距離を測定したために生じたものである。

測線 A-A'(図-9, 図-10)では、採石が進行するに従って内向きの変位が生じ、徐々に測定距離が小さくなっている。内空に内向き 1~2mm 程度の変位が生じているが、収束傾向にある。この測線は、採石地下空間の空洞軸を測定している関係から、採石地下空間内の採石箇所に関係なく相対誤差 0.002%以下で一樣で、測定精度は良好である。測線 D-D'(図-11, 図-12)では、測線 A-A'と同様に内空に 1~2mm 程度の変位が生じている。この変位も測線 A-A'と同様に収束傾向にある。また、測線 E-E'(図-13, 図-14)の測定値は、多少空洞内向きに変位が生じているが、測定当初の値からそれほど大きく変化はしていない。測線 E-E', 測線 F-F'は、測線 A-A'~D-D'を測定し始めてしばらく期間を置いた後測定を始めた測線であるが、初期値からほとんど変位は生じていない。測線 E-E'(図-15, 図-16)は、測定距離が初期値よりも極端に大きい点がある。測定開始から 20 日を過ぎたあたりで突然大きくなり、60 日目までの相対誤差がそれ以降に比べて大きく(図-16)、測定値の信頼性が低いので、変位 = -4mm より大きい変位データの点を考えずに変位の検討を行なうと、ほとんど変位は生じていないと判断できる。これは、測定する足場が採石によって下がったことで、測定の際にゴムの固定具に手を触れたためであると考えられる。レーザー距離測定器の測定精度は、 $\pm 1.5\text{mm}$ であるが、図-10, 図-12, 図-14, 図-16 で示されるように、動きは僅かであっても、一定の誤差のもとで、内空が内向きに動いている傾向は、図-9, 図-11, 図-13, 図-15 が示すとおりである。なお、レーザー測定器は、測定を実施する毎に固定治具に設置しているので、距離測定器と固定治具の馴染みが測定値に及ぼす影響は、一定のばらつきを持つので、変位が収束傾向であることに影響しない。

4.4 簡易弾性波検査による節理調査

著者らは、ウルトラソニックスコープ(MARUI Ultra Sonic Tester)を用いて、節理が現れている箇所(図-6)で、簡易

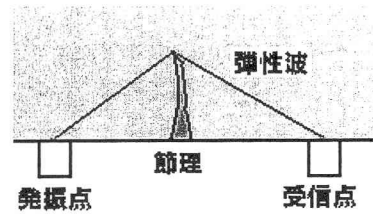


図-18 T_c-T_0 法による節理深さ推測の概念

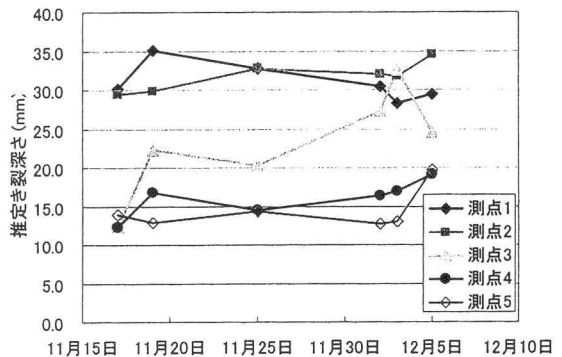


図-19 コンクリートボンドを使用した場合のクラック深さの時間的変化

弾性波探査試験を行なった(図-17)。これは、大谷採石地下空間に数箇所ある節理(クラック)を跨ぐ弾性波の伝播とその近傍の健全部分における弾性波の伝播時間の差を計測し、クラック深さを算出することを目的とする。クラック深さの計算方法は、発・受信子をひび割れからそれぞれ等距離に配置したときの伝播時間 T_0 と、ひび割れのない近傍表面での伝播時間 T_0 からひび割れ深さを計算する $T_0 - T_0$ 法⁴⁾を用いた(図-18)。クラックを迂回して伝わる弾性波の受信点における時間的遅れにより、クラックの深さを相対的に判断する。簡易的に地下壁面のクラック部分を判定するため、大谷石の表面には凹凸が非常に多いので、測定面にはコンクリートボンドを用いて、発・受信子の触れる面を平滑にした。測定結果を図-19に示す。一部のクラックの深さが増加傾向にあると推測でき、時間が経過するにつれ、節理の密着度が下がり開口深さが深まっていると考えられる。発振子・受信子の接触状況で測定値に、ばらつきが生じるので、継続調査が必要である。

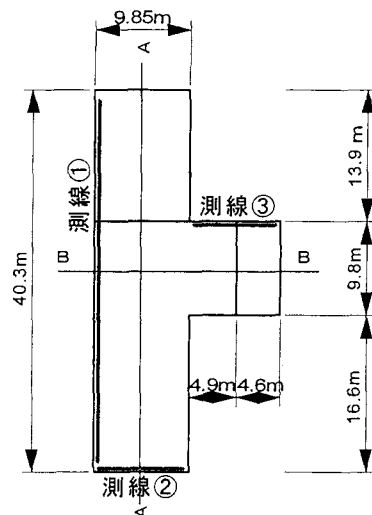


図-20 弾性波探査の実施測線

4.5 弾性波探査試験によるゆるみ領域調査

大谷採石地下空間において、著者らは建設技術者の協力を得て、岩盤の弾性波速度、および採石による緩み範囲などを調べる目的で、弾性波探査を実施した。調査は3測線(図-20)、延べ55mにわたって実施した。大谷採石地下空間の地山が、均質な大谷石で構成されていること、走時曲線から、第1層と第2層の弾性波速度に大きな差異が認められないこと、測線長が比較的短いことから、“萩原の方法”による第1層と第2層の弾性波速度と緩み深度を算出した。各測線ともおいて第1層、第2層の速度差が10%~15%と比較的小さく現れた。測線①(測線長さ39.4m、測点間隔1.7m)で、第1層弾性波速度 $V_1^{①}=2.1$ km/s、第2層の弾性波速度 $V_2^{①}=2.4$ km/s、緩み深度 $z^{①}=1.0$ m~2.0 m、測線②(測線長さ8.5m、測点間隔0.7m)で、第1層弾性波速度 $V_1^{②}=2.2$ km/s、第2層の弾性波速度 $V_2^{②}=2.3$ km/s、緩み深度 $z^{②}=0.0$ m~0.4 m、測線③(測線長さ8.5m、測点間隔0.7m)で、第1層弾性波速度 $V_1^{③}=2.0$ km/s、第2層の弾性波速度 $V_2^{③}=2.2$ km/s、緩み深度 $z^{③}=1.0$ m~1.5 mとなった。本調査により、採石に伴って地山の応力が解放され、ゆるみ域が坑壁周囲にあることがわかった。ただし、ゆるみ深さの定量的な判断を行うためには、測線長が比較的小さいので、弾性波の反射波、屈折波の伝播状況とゆるみ域の深さの関係の信頼性を上げる必要がある。

5. 岩盤分類による安定評価

本研究では、RMR および Q 値⁵⁾を用いて、対象とした採石地下空間の安定性を評価した。大谷の採石地下空間は通常残柱式であるが、本研究で用いた採石地下空間は、採石場の最端部にあり、最も近い隣接空間と約40m離れているので、単独の採石地下空間と見なし、以下の安定評価を行う。

5.1 RMRによる検討

地下空洞周囲の岩盤の複雑な挙動の指標としては、RQD (Rock Quality Designation)、粘土充てん物、風化の影響など、いくつかの要素を組み合わせる必要がある。そこでZ.T.Bieniawskiによって提案されたRMR (Rock Mass Rating)⁵⁾を、本研究で対象とした採石地下空間に適応した。このために必要な地盤分類には、(1) 岩盤良好度 (RQD)、(2) 風化の状態、(3) インタクト・ロックの一軸圧縮強さ、(4) 節理および層理の間隔、(5) 走向および傾斜の方向、(6) 節

表-1 岩盤分類パラメータの評点決定

分類パラメータ	大谷石の値	評点
岩石強度（一軸圧縮強さ）	8~10MPa	1
RQD	95%	20
節理の間隔	3m 以上	30
節理の状態	粗い, 密着	25
地下水（湧水）の一般的状態	湿潤	7
節理の走行と傾斜	非常に有利	±0

理の分離性, (7) 節理の連続性, (8) 地下水の流れなどのパラメータが設定されている。まず, 地盤分類を用いて, 表-1のように岩盤分類パラメータを決定した。これから, ここで, 優勢な節理群の走向がトンネル軸に直交し, その傾斜は, 採石地下空間の主軸方向に対して 45°~90°であるため, 採石に与える影響としては「非常に有利」(影響が小さい)と判断した。したがって, 最終的な評点 RMR (Rock Mass Rating) 値の合計は 83 点となり, 岩盤区分はクラス I の下限に近く, その記載は「非常に良好な岩」となる。そこで図-21 から, この岩盤内における無支保スパン 10m の空洞の自立時間は, 評点 83 点のラインからおよそ 2 年と判断される。ここで, RQD 値は, 実際にボーリングをすることはできなかったもので, 採石地下空間から切り出される大谷石ブロック中に含まれる節理から推定した。

5.2 NGI トンネル掘削岩盤指数による検討

本研究では, トンネル掘削のために N.Barton らにより提案された岩盤分類のインデックス Q 値⁹⁾を求めるシステムを大谷採石地下空間に適用した。この手法を採石地下空間に適用するには, 空洞の等価寸法を定める必要がある。そのため, 採石(掘削)中の空洞の分岐点から, 東, 西, 北方向の 3 空洞を有するとして, 図-22 のように空洞①~③と定め, それぞれについて評価を行なった。まず, NGI トンネル掘削岩盤指数 Q 値を求めるために, 必要な値を導出する。RQD=95%, 節理は 1 方向なので $j_n=2$, 不連続性節理であるため $j_r=4$, 節理は強く結合し, 硬質なため $j_a=0.75$, 湧水は少量であるため $j_w=1.0$, 弱層が空洞と交差し, 応力低減係数 $SRF=5.0$ (粘土, あるいは化学的に風化した岩石を含む単一の弱層[掘削深さ 50m 以下])を用いて, Q 値は 50.67 と計算された。Barton の提案する ESR 値を用いて図-22 に示す領域①~③における等価寸法 D_e を求める。大谷の採石地下空洞は仮設的な採掘空洞なので, $ESR=3 \sim 5$ となり, このうち最も危険な状態を想定し $ESR=3$ として以下のように計算を行なった。なお, ここでは領域①~③のスパン(Length), 幅(Band), 高さ(Depth)のうち最も大きいものをそれぞれ $\ell_1 \sim \ell_3$ として, 領域①($\ell_1=15.10$ m, Depth, $D_{e1}=5.03$ m), 領域②($\ell_2=9.79$ m, Band, $D_{e2}=3.26$ m), 領域③($\ell_3=16.55$ m, Length, $D_{e3}=5.52$ m)を計算する。一方で, 恒久的な鉱山の空洞として大谷の採石地下空間を評価した場合, $ESR=1.6$ となるので, その場合についても考えてみると, 領域①'($\ell_1=15.10$ m, Depth, $D_{e1}=9.44$ m), 領域②'($\ell_2=9.79$ m, Width, $D_{e2}=6.11$ m), 領域③'($\ell_3=16.55$ m, Length, $D_{e3}=10.34$ m)となる。これらの値を図-23 中にプロットすることにより支保の必要性を判断する。この図より, 等価寸法 D_e が約 10 m 以下であれば無支保で問題ないと判断される。よって, 領域③'以外は支保工が必要となる境界線よりも下部にプロットされるため, 支保の必要性はないと判断できる。

6. まとめ

著者らは, 現在も大谷石を採掘している採石地下空間において, 岩盤構造物としての安定性を, 現場計測をもとに

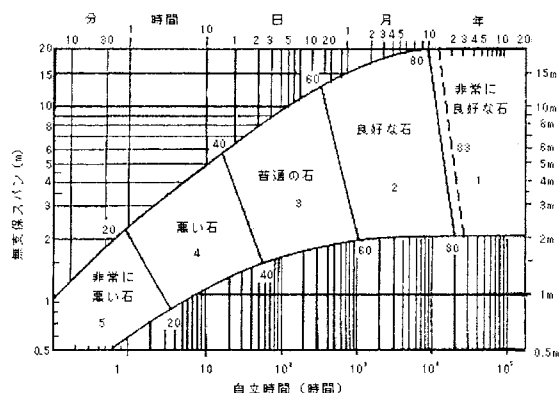


図-21 CSIR の指標⁹⁾による大谷石層の無支保採石地下空間の自立時間評価 (図中点線が算出値)

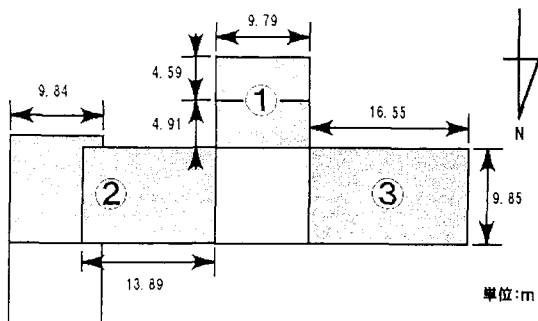


図-22 採石地下空間の分割例

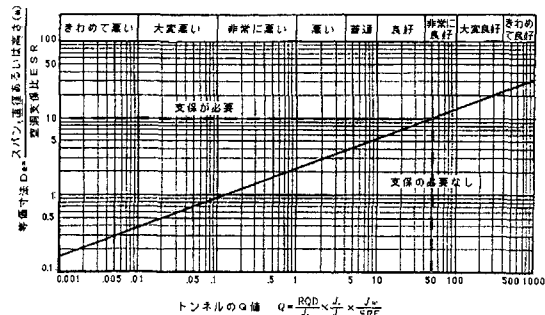


図-23 最大等価寸法 D_e と Q 値の関係⁵⁾ (図中点線で示される D_e が該当する Q 値の上限値)

評価することを試みた。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 採石地下空間の採石をつづけている空洞に8つの測線を設定して、レーザー距離測定器を用いて測定した。その結果、内空に1~2 mm 程度の変位が生じているということが確認できるが、その変位の増加傾向は収束する傾向が見られるので、安定傾向にある。また、測定誤差がすべての測定に一定の偏差の範囲内にあるので、測定の精度も十分である。しかしながら、この採石地下空間における大谷石採石は現在もお実施されているので、継続計測をし、その安定傾向を検証する必要がある。
- (2) ウルトラスンニックスコープを用いた簡易弾性波検査によって $T_c - T_0$ 法を応用し、節理の調査を実施した。その結果、わずかであるが、採石を実施することで、一部クラックの深さが増加傾向にあると考えられた。ただし発振子・受信子の接触状況で数値にかなりのばらつきが生じるので、継続的な調査が必要である。
- (3) 弾性波探査試験によるゆるみ領域を調査した結果、与えた弾性波のエネルギーが小さいことや、測線が比較的短いなかで、緩み域の深さが深くとも1.0 m~2.0 m であることが計測された。この緩み域が採石を継続することで、広がるものを測定する必要があるが、現状でその深さが比較的浅いことより、対象採石地下空間は、安定傾向にある。
- (4) RMR 法によって、対象とする大谷石の採石地下空間の安定性を評価した結果、無支保で2年は安全であるという結果を得た。近接する採石地下空間で、30年以上無支保でその構造を保っている場所もあるので、その近接空洞の調査も併せて検討しその適用性を検討する必要がある。
- (5) 対象とした大谷石の採石地下空間を3つの空洞に区分して、NGIの Q 値を算出して検討した結果、仮設の無支保空洞として位置づける場合であれば、無支保で安定が保障されるが、恒久的な鉱山の空洞として大谷の採石地下空間を評価した場合は、一部空洞で、支保の必要があることが指摘された。そこで、この採石地下空間を利用する場合、その利用方法によって支保を施すかを選択する必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、大谷資料館 HP, <http://www.oya909.co.jp/>
- 2) 東京通商産業局編：大谷地域における大谷石採石技術指針, 1983.
- 3) 大谷石採取場跡地安定度評価について, 栃木県, 2000.9.
- 4) 小林賢一・荒木宏則・海野忠行・池尻 健：地下空間保守管理のための新しいひび割れ探査技術, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.6, pp.69-78, 2001.
- 5) Evert Hoek, Edwin T.Brown 共著 小野寺透・吉中龍之進・斉藤正忠・北川隆 共訳：岩盤地下空洞の設計と施工, 土木工学社, 1985.2.