

簡易現場試験による大谷石採石地下空間の 構造健全度調査の試み

片寄 友康¹・清木 隆文^{2*}

¹福島県 土木部 (〒960-8670 福島県福島市杉妻町2-16)

²宇都宮大学 工学部 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

*E-mail: tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

栃木県宇都宮市の大谷地域にある大谷石の採石地下空間は、平成元年から3年の大規模な崩落事故を起こした後、安定度評価を行政が発表したが、相対的な評価であるので、個々の採石地下空間の安定性を検討する場合の簡易な評価方法が必要とされる。本研究では、簡易な現場試験として、採石地下空間の構造を支えている残柱、壁面などを対象にシュミットハンマー試験を実施し、ハンマー反発度を弾性係数に換算した。同様の調査を節理近傍についても実施した結果、データが異なる傾向を示すことから、残柱などが健全である傾向を抽出した。これらの結果を有限要素法の解析結果と比較し、採石地下空間における簡易現場試験の結果により、残柱などの健全性を評価する可能性について考察した。

Key Words : *Oya tuff, underground quarries, Schmidt hammer test, field measurement, mechanical stability*

1. はじめに

大谷石を産出する栃木県宇都宮市の大谷町には、東西約3.0km、南北5.5kmの範囲に大小250箇所あまりの地下に、採石場として切り広げられた採石地下空間がある。これらの中の数箇所が、現在までに崩落陥没事故を起こしているが、その中でも、平成元年から3年にかけて発生した陥没事故は、大谷地域の住民に不安を与えただけでなく、その後の大谷の石材産業、観光産業のイメージをダウンさせ、現在に至っている。その後、栃木県、宇都宮市、大谷地域整備公社と有識者が大谷の採石地下空間の安定度評価を行い、各空間の相対的な安定性を見積もり、地域住民に公開した¹⁾。今後の大谷地域には、この安定度評価を生かし、危険と判断される採石地下空間は、埋め戻すことで安全宣言をするとともに、安定度の高い採石地下空間は、大谷地域の産業振興のために有効利用することが望まれる。また、現在大谷地域内では、全盛期に比べ少ないながらも大谷石の採石を進めている採石場があり、その結果に切り広げられる採石地下空間の安全性を評価することが望まれている^{2),3)}。そこで本研究では、採石地下空間を支える残柱および壁面に着目し、高さ方向の見かけの弾性係数の変化の様子を調査し、掘削年代別に整理することにより、地下空間の安定性との関

連を検証することを目的としている。

2. 大谷採石地下空間の安定度評価と個別評価の試み

(1) 大谷採石地下空間の安定性評価について

栃木県は、平成13年に大谷石採取場跡地安定度評価¹⁾を大谷地域の住民に公表した。この安定度評価は、採石場を344のブロックに分け、それぞれ採石地下空間の地盤と地質条件、空洞内の荒廃状況、残柱などに作用する応力と一軸圧縮強さとの比較、採石地下空間の地表からの浅深の状態により、安定度をAランク(安定度が高い)、Bランク(安定度が概ね高い)、Cランク(安定度がやや低い)、Dランク(安定度が低い)と評価した結果が示されている。残念ながら安定度が低いとするDランクの箇所が344ブロック中92ブロックという結果となっている。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、大きな問題である。現在、構造特区の申請などにより、この状態の打開が試みられている。

(2) 採石地下空間の個別評価の必要性について



図-1 採石地下空間 A の石材切り出し部周辺



図-2 採石地下空間 B の立坑付近

大谷採石地下空間は、個々に形状が大きく異なり、また採石地下空間どうしが複雑に繋がったり、近接したりしている。個々の採石(跡)地下空間を埋め戻しや有効利用するためには、相対的な安定度評価ではなく、個々の絶対評価が必要である。このためには、採石地下空間の内部調査、地形、地質条件などの情報が必要である。これらの調査をできるだけ安価に簡易に実施することが必要である。採石地下空間の強度の確認対象として、天端、残柱(壁面)、立坑が挙げられ、節理や風化に伴う劣化、湧水などの有無、天端と土被り厚さなどが考えられ、先に公表された安定度評価を基礎とした評価法の提案が望まれる。本研究では、その基礎的研究として採石地下空間の壁面や残柱を対象として、シュミットハンマーによる打撃試験を実施し、その部分の健全度を推定することを試みた。

3. シュミットハンマーによる原位置簡易試験

(1) シュミットハンマー試験と弾性係数の換算について

本研究では、シュミットハンマーを用いて、大谷石採石地下空間の残柱、壁面を対象に打撃試験を行った。打撃によって得られたハンマー反発度から強度や弾性係数に換算することができる。ハンマー反発度と岩盤の弾性係数との関係は、菊地ら⁴⁾が軟岩から硬岩まで広い範囲の岩盤で実験を行い、式(1)のように提案している。

$$\log_{10} E = 0.0331 \times S + 2.695 \quad (1)$$

ここに E は、弾性係数 (MN/m^2) であり、 S は、ハンマー反発度である。本研究では、この式を用いて現場で得られたハンマー反発度から弾性係数へと換算した。

(2) 測定方法

測定箇所は、栃木県宇都宮市大谷町にある現在掘削中の



図-3 大谷採石地下空間におけるハンマー反発度測定状況

2つの大谷石採石地下空洞である。この2箇所の地下採石場をそれぞれ採石地下空間 A (図-1)、採石地下空間 B (図-2) とする。著者らは、それぞれの採石地下空間において、所有者に採石期間、採石区域と掘削時期の関連をヒアリングし、採石地下空間の平面図上で整理した。この結果を用いて、空間を支える残柱と壁面が掘り出されてからの経過年数(以下、掘削年代)を推定した。

a) 採石場地下空間 A の概要

採石地下空間 A は、土被りが 40 m で、採石を始めて 30 年が経過している残柱式の空洞で、柱の高さが最大 30 m 程度まで採掘されており、年間を通して湧水が見られない。場所によっては天端に節理の多い箇所がみられたが、この場所では大谷石の採石を行わず、鉄骨によって補強されていた。

b) 採石地下空間 B

採石地下空間 B は、土被りが 40 m 程度であり、空間高さが最大 15 m 程度までの採掘がされている。主空洞から小空間を横方向に掘り進める形で地下空間を形成している。特に夏季は比較的多い量の地下水が湧き出ているが、冬季は一部を除き、湧水が見られなくなる。これは、周

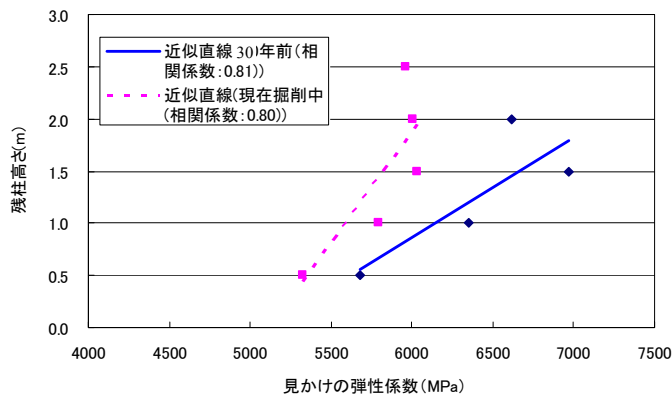


図-4 高さ方向の弾性係数の変化
(採石地下空間 A)

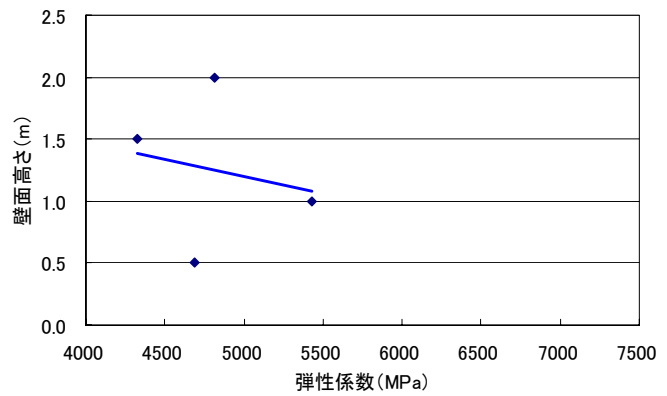


図-6 節理周辺の乱れが大きな場合の現場測定
結果(採石地下空間 B)

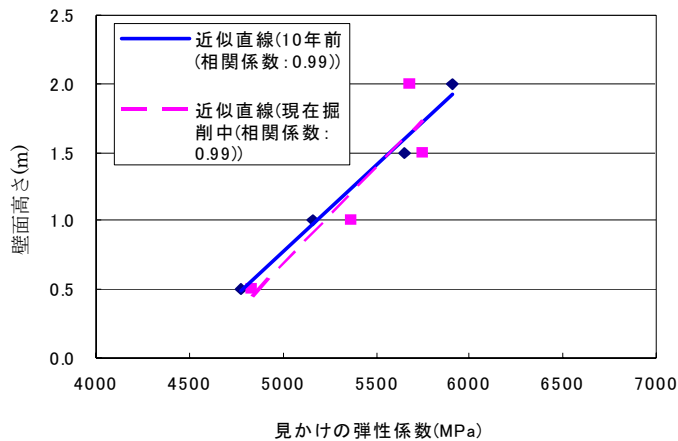


図-5 高さ方向の弾性係数の変化
(採石地下空間 B)

囲の夏季と冬季の地下水位の差が原因と考えられる。対象地下空間 A と同様に、天端に生傷(節理)の多い箇所には鉄骨によって補強がなされ、壁面に生傷が現れている場合は、壁面からの深さを推定して、異型鉄筋で壁が補強されていた。

c) シュミットハンマー試験の改善点

地盤工学会基準(JGS 3411-2004)「岩盤のシュミット式ハンマー試験方法」⁵⁾で、岩盤のシュミットハンマーの測定方法が定められており、15～50 cm 四方の測定面を選定し、測定面内に最低 9 点の測定面を設けシュミットハンマーによる打撃を行い、全測定値の平均値をその測定面におけるハンマー反発度とするとされている。

ハンマー反発度に大きなばらつきが生じることを考慮し、本研究では 25 cm 四方の測定面内で 25 回打撃を行い、得られた反発度から大小それぞれ 3 つの反発度を除き、19 回のハンマー反発度を平均して弾性係数に換算した。

d) 大谷石の測定可能範囲

大谷石の一般的な 40 cm×30 cm×90 cm の直方体ブロックの 30cm×40cm の面に対して、シュミットハンマー試験を行ったところ、石材を切り出したばかりの大谷石

の健全な壁面の反発度が得られたが、30 cm×90 cm の面に同様の試験を試したところ、極端に低い反発度となった。大谷石を切り出した壁面の概ね 90 cm 以深まで健全であれば、大谷石の一般的なハンマー反発度が得られる。

採石地下空間における測定は、掘削年代別に残柱及び壁面の高さ方向に各 1 側線を設定して行い、残柱および壁面の測定位置は下端から 0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m とした。採石地下空間の壁面におけるハンマー反発度の測定の様子を図-3 に示す。

(3) 現場における測定結果について

a) 採石地下空間 A

図-4 は、掘削年代が 30 年前、10 年前に掘り出されたと推定された残柱において側線に沿った弾性係数の高さ方向への変化の様子を示している。図中の近似直線は、測定結果から推定した弾性係数の増減傾向を示し、残柱下端の位置で弾性係数が最も低く、底面からの高さが高くなるに従って、弾性係数が高くなる傾向を示している。また、残柱の掘削年代が古くなるに従い、近似直線の傾きが小さくなり、高さ方向に弾性係数が増加する割合が大きくなる傾向を示した。このことから、時間経過に伴い健全な大谷石の安定性が向上する可能性を示した。この原因については、現在検討を進めている。

b) 採石地下空間 B

図-5 は、掘削年代が 10 年前と採石直後の壁面の側線に沿った弾性係数の高さ方向への変化の様子を示している。一部の節理近傍の壁面では、側線に沿った換算弾性係数の値は、計測高さが高くなるに従って減少、あるいはばらつきの大きい傾向を示した。これらのデータは、同様の傾向の試験結果と周辺部の地質条件から分かることを蓄積することで、壁面や残柱の背面に、節理や弱面が隠れている場合の判別に、シュミットハンマー試験が活用できる可能性を示した。これらの測定結果以外は、採石地下空間 A と同様に、壁面の下端の位置で弾性係数

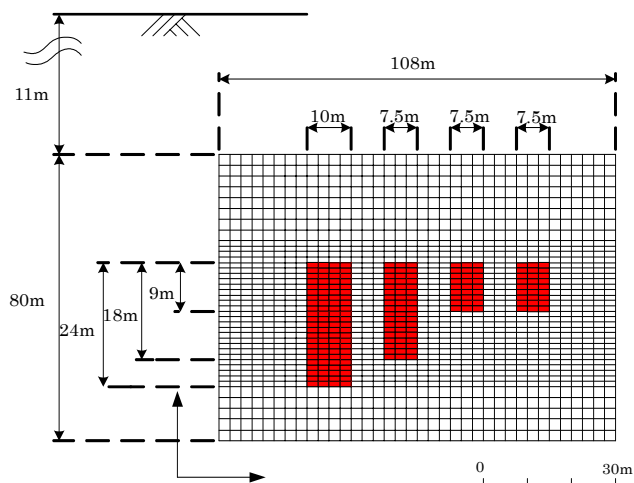


図-7 採石地下空間 A の解析モデル

表-1 解析に用いた大谷石の物性値

項目	物性値
単位体積重量(MN/m^3)	0.018
弾性係数(GPa)	5.51
粘着力(MPa)	3.17
内部摩擦角($^\circ$)	29.6

が最も低く、底面からの高さが高くなるに従って、弾性係数が高くなる傾向を示した。しかし掘削年代別に見ると、近似直線の傾きがほぼ同じで、掘削年代の違いによる弾性係数の分布傾向の違いは見られなかった。これは、採石地下空間 A は掘削を始めてから 30 年経過しているのに対し、採石地下空間 B では掘削を始めてから掘削開始からの経過年数が短いことが考えられる。

4. 有限要素法を用いた採石地下空間の弾性掘削解析

本研究では、現場でシュミットハンマー試験によって測定したハンマー反発度から換算した弾性係数の残柱や壁面上の分布傾向を確認するために、2 つの採石地下空間の現在掘削中の空間断面をモデル化し、有限要素法によって、2 次元平面ひずみ弾性解析を行った。表-1 に本解析で用いた大谷石の材料定数を示す。これらの定数は、室内試験や文献²⁾から決定した。また、大谷地域の初期応力は、文献の側圧係数⁹⁾をもとに推定し、掘削解析を実施した。

(1) 解析方法

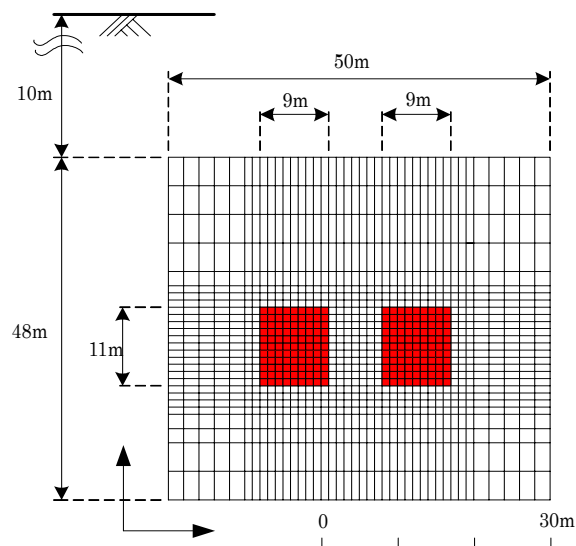


図-8 採石地下空間 B の解析モデル図

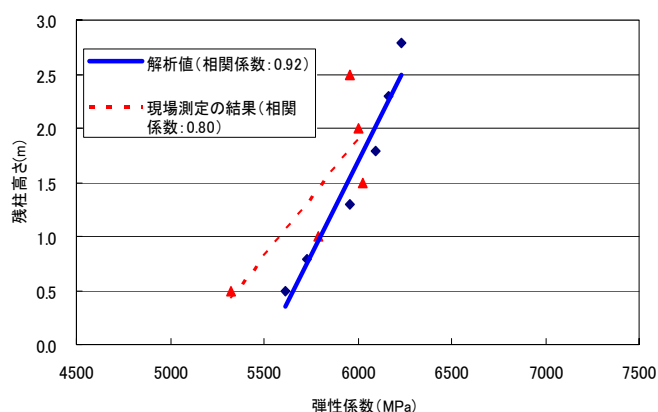


図-9 解析結果と現場測定結果の比較

本研究で対象とした採石地下空間 A、B の現在採石を実施している断面を基準として、適当な断面を設定し、簡単な有限要素モデルをそれぞれ図-7、図-8 のように作成した。境界条件は左右両端面を水平方向固定、下端面を鉛直方向固定とし、大谷石層以上に存在する土被りは、等分布荷重に換算して与えた。図中の色が濃い矩形の部分が、採石地下空間の断面であり、この部分を上から逐次採掘するように四角形要素を削除し、地下空間を再現した。一度の掘削ステップ数は、幅 2.5 m、高さ 1.0 m のブロックとした。今回は掘削ステップ数を 200 と設定し、解析結果をもとに、残柱の高さ方向の見かけの弾性係数の変化を確認した。

(2) 解析結果

高さ方向の見かけの弾性係数の傾向を図-9 に示す。解析結果と現場測定の結果を比較すると、現場の計測結果と同様に残柱、壁面の高さ方向に、弾性係数が増加する傾向を示した。特に採石地下空間 A は 30 年間無支保で自



図-10 採石地下空間 A の壁面にある節理

立し安全を保っているの、この結果をもとに考えると、残柱の高さ方向の弾性係数の変化は、右上がりの傾向が健全な状態であると推測される。

5. 採石地下空間内に節理や弱面が存在した場合の弾性係数の挙動

(1) 弱面、節理を内在する地下空間のモデル化

今回、2 箇所の採石地下空間でシュミットハンマー試験を行ったが、図-10 に見られるような節理近傍で測定したときや、現場の状況から岩盤内部に節理が生じていると考えられる箇所で測定した場合、高さ方向の弾性係数の挙動が、他の箇所のような右上がりの傾向ではなく、大きなばらつきを示し、右下がりの傾向を示した(図-6)。そこで簡単な解析モデルを設定し、採石地下空間近傍の弱面や節理などを表現し、高さ方向の弾性係数の挙動にどのような影響を与えるか考察を行った。図-11 にその一例を示す。弱面は大谷石の弾性係数の 1/10 を与えることで表現し、節理の部分はジョイント要素でモデル化した。

(2) 解析結果

解析を数パターン行った結果、節理や弱面が採石地下空間内に存在することにより、高さ方向の弾性係数の挙動に変化が生じることが示された。特に、節理をジョイント要素でモデル化し、せん断には全く抵抗しないと設定し最も危険な状態を考え解析した結果、採石地下空間内の節理近傍で測定した結果と同様に、高さ方向の弾性係数は、高さが高くなるにつれて、わずかに右下がりとなる傾向を示した。この結果を図-12 に示す。これらの結果から、シュミットハンマー試験を行い、高さ方向の弾性係数の挙動について調査を行えば、簡易的に空間内の危険箇所の確認を行える可能性を示した。

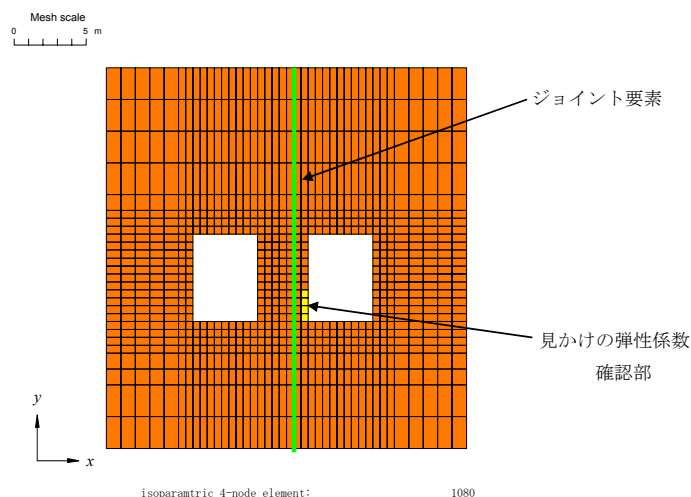


図-11 空間内に節理が生じているとしたモデル図

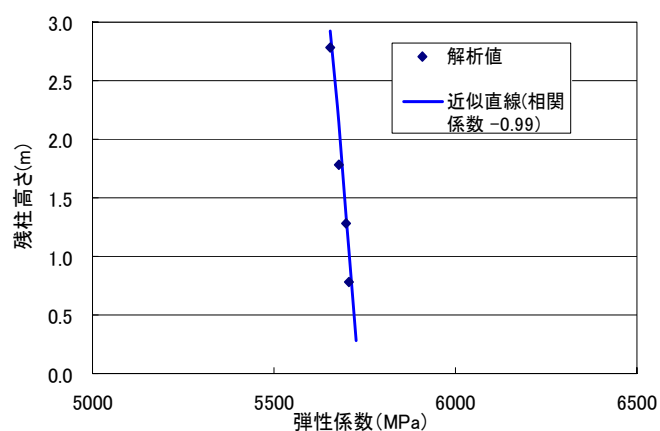


図-12 ジョイント要素を含んだ残柱の解析による弾性係数分布

6. まとめ

本研究によって得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 2 箇所の大谷石の採石地下空間におけるシュミットハンマー試験のハンマー反発度をもとに、見掛けの弾性係数を換算し高さ方向の分布を調べた。その結果、2 つの採石地下空間の残柱や壁面の健全な分布の傾向が明らかになった。
- (2) 2 箇所の大谷石の採石地下空間の残柱や壁面に節理や弱面を内在する場合、高さ方向の弾性係数の分布に影響を与える可能性を示した。
- (3) (1), (2)の結果を比較することで、簡易的に採石地下空間の危険箇所の確認を行うことのできる可能性を示した。

7. 今後の課題

- (1) 本研究をまとめるにあたり、2 箇所の大谷石採石地下

空間においてシュミットハンマー試験を行い、ハンマー反発度を計測した。その結果、残柱や壁面における高さ方向への換算弾性係数の変化が2つの採石地下空間ともに同様であり、最長で30年間ほぼ無支保で空洞が安定であったことから、安定を示す傾向として判断したが、今回の傾向が一般的であると言うには事例数が十分とはいえない。また、一つの採石地下空間を見ても、空間そのものの安定度を議論するには、データも十分ではない。そこで、個々の採石地下空間における調査を継続するだけでなく、他の採石地下空間の調査も行い、地下空間の安定性について一般的な評価ができるか確認を行う。

- (2) 大谷石採石地下空洞において、残柱の高さ方向の弾性係数の変化を掘削年代別に測定した結果、時間経過に伴って弾性係数が大きくなり、結果として大谷石の安定性が向上する可能性を示した。今回の事例との関連性について検討を進める。
- (3) 現場の測定結果を正確に数値解析に反映できない理由の一つとして、複雑な採石地下空間の構造を2次元で表現するのは難しいことが挙げられる。よって現場の状況に即した解析を行うために、解析プログラムの改善が望まれる。

して下さいました大谷石材協同組合と、調査の現場、岩石資料を提供して下さいました関係石材会社、御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 栃木県、大谷石採取場跡地安定度評価について、平成13年10月4日説明会資料,2001.
- 2) Seiki, T., Matsueda S. and Emori, T.: *Numerical Study for Stochastic Stability Analysis of Underground Quarry of Oya Tuff in Japan*, Proc. of WCCM VI, Beijing, China, CD-ROM., 2004.
- 3) Seiki, T., Chiba T. and Emori, T.: *Study on the Utility Assessment of Underground Quarry for Oya Tuff*, Proc. of 1st Int. Symp. on Travertine, Denizli, Turkey, pp.245-255, 2005.
- 4) 斉藤和雄, 菊地宏吉:岩盤計測におけるシュミットハンマーの適用, 第9回岩盤力学に関するシンポジウム概要講演集, pp.61-65, 1974.
- 5) 地盤工学会, 岩の試験・調査方法の基準・解説書 平成18年度版, pp.65-86, 2006.
- 6) Watanabe, H., Tano, H., Aydan, Ö., Ulusay, R., E. Tuncay, Bilgin, A. and Seiki, T.: *The Measurement of the In-situ Stress State by Acoustic Emission Method (AEM) in Weak Rocks*, Proc. of Int. Symp. on Rock Stress, Kumamoto, Japan, pp.389-394, 2003.

謝辞: 本研究を実施するにあたり、大谷地域内の石材会社を紹介して下さいるとともに、調査を行うための調整を

TRIAL OF STRUCTURAL STABILITY SOUNDING BY SIMPLE FIELD MEASUREMENT IN UNDERGROUND QUARRIES FOR OYA TUFF

Tomoyasu KATAYOSE and Takafumi SEIKI

The authors carried out Schmidt hammer test along the pillars and walls in underground quarries excavating Oya tuff or Oya stone in the Oya region, Utsunomiya City, Tochigi Prefecture. And they tried to evaluate elastic modulus from the bottom to certain heights of them by those measurements. Those results show that the elastic modulus tends to increase along the heights of the pillars and walls. In addition, the property tends to decrease or scatter along the height if the discontinuities or weak zone exists in pillars and walls. And 2-D elastic plane strain FEM analysis also shows almost same tendency as the field measurements. This study will help to evaluate absolute stability of each underground quarry.