

大谷採石地下空間の採石時および 地震時安定性評価について

CONSIDERATION OF STABILITY ASSESSMENT FOR OYA TUFF UNDERGROUND QUARRY ON QUARRYING AND EARTHQUAKE

高葉 悠¹・島田 大輔^{2*}・大坪 孝太郎³・清木 隆文⁴

Haruka TAKABA¹, Daisuke SHIMADA^{2*},
Koutaro OTSUBO³, Takafumi SEIKI⁴

A number of the huge underground space by quarrying Oya tuff, which is used for building materials etc., located in Oya area, Utsunomiya city, Tochigi prefecture. As those spaces are regarded as underground space resources, the utilization ways have been considered to revitalize Oya area. Since several ruined underground quarries enormously collapsed the consideration has stoppend. However, it has been realized that theoe collapses irregular quarrying caused those collapse. In terms to secure the collapse accidents, it is necessary to evaluate stability assessment on individual ruined quarry to reutilize them. This study focuses on consideration of structural soundness for some Oya tuff underground quarries on quarrying and eathquake. First of all we creates these 3D structures based on measurement data by FLAC3D. And the authors numerically assess the structural stability and compare the result with the field measurement. Eventually, it is clear that the underground space of Oya tuff underground quarries are structurally stable at both stages even though a class II earthquake damages some parts of the underground space. But in case of local earthquake of Tohoku and East Japan earthquake, the underground quarries may be damaged serioulsy.

Key Words : Oya tuff, underground space, seismic stability structural stability, quarrying

1. はじめに

(1) 研究目的と背景

栃木県宇都宮市に産出する大谷石は、主に住宅等の建築用材などに使用されてきた。宇都宮市には、この大谷石の掘削により形成された、広大な地下空間が無数に存在する。これらの地下空間を貴重な空間資源と捉え有効利用することは、大谷町の活性化につながる事が期待でき、さまざまな施設利用が検討されている¹⁾。大谷採石地下空間においては、これまで大規模な陥没事故が発生しその危険性が表面化した²⁾が、その後の調査や既往の研究²⁹⁾により、採石地下空間の陥没事故の主な原因は安全性を軽視した採掘方法にあり、全ての採石地下空間が危険ではないということが示された。この陥没事故の経緯により、大谷採石地下空間の有効利用は、その安全性の保障が前提となる。そこで、本研究では大谷採石地下

空間の安全性を評価する手法を確立することを目的として、現地調査及び有限差分法による解析ソフトFLAC3D (Itasca社)により、栃木県宇都宮市にある大谷採石地下空間を対象に、その掘削時および地震時の安全性評価を行う。

(2) 既往の研究およびトンネルの健全性評価手法について

大谷町では、平成元年から3年にかけて大規模な陥没事故が発生したため、大谷石採石場跡地に地震計を設置し、地下空洞の天盤、壁面あるいは残柱から剥離落下する岩片の床面衝突や、岩盤内部の亀裂発達等によって発生する衝撃振動の観測が行われ、監視する観測システム等の更新が行われてきた⁴⁾。

道路トンネルの健全性評価⁵⁾においては、第三者被害に関係する変状と構造的安定性に関係する変状に分けて

キーワード：大谷石、地下空間、耐震性、安全性、採石時

¹学生会員 宇都宮大学大学院 Utsunomiya University Graduate School, (E-mail:mt126633@cc.utsunomiya-u.ac.jp)

²学生会員 宇都宮大学大学院 Utsunomiya University Graduate School,

³非会員 株式会社竹中土木 Takenaka Civil Engineering & construction Co., Ltd.

⁴正会員 宇都宮大学大学院 Utsunomiya University Graduate School,

評価を行う手法⁶⁾が提案されている。また、大坪⁷⁾により、大谷採石地下空間の健全性評価フローが提案された(図-1)。本研究では、道路トンネルの健全性評価手法を参考に、大谷採石地下空間の安全性評価手法の確立を目的として、3次元解析ソフトを用いて大谷採石地下空間の掘削時および地震時安定性について検討する。

2. 大谷採石地下空間の3次元安定性解析

(1) 安定性解析の手順

簡単な解析の流れを図-2に示す。解析は、地盤モデルを作成後、まず初期応力を求めた。その後、掘削領域を一度に取り除く掘削解析を行い、地下空間の変位や降伏状態を確認した。また、掘削解析後の地質構造モデルに地震波を与え、空洞内壁面のひずみと降伏状態を確認した。本研究で行った解析は、Mohr-Coulombの破壊規準に従うとし、掘削解析は計算が収束するまで行った。対象とした採石地下空間の湧水はわずかであるので、本研究では問題を簡略化するために、全応力解析を行った。また、解析モデルの境界条件は、境界面を構成する節点の速度をゼロに固定した。これは、本解析が、応力ひずみ関係を得るために運動方程式を解き、速度の増分を未知量とするためである。

(2) 掘削する地盤の設定について

安定性解析の対象とした大谷採石地下空間を、測量データ(図-3)をもとに再現した形状を図-4に示す。このモデルは、340m×280m×70mの解析領域を持ち、2m×2m×2mのゾーン(要素)833,000個で構成されている。大谷石は30cm×40cm×90cm程度のブロック状によって切り出されており、3次元安定解析を行う際には、1ゾーンの大きさを採石される石材の大きさに設定して採石を再現することが望ましいが、1ゾーンの大きさを30cm×40cm×90cmに設定した場合、計算時間に莫大な時間を要する。そこで、掘削ゾーンの大きさをある程度大きくとっても破壊に与える影響は小さい⁸⁾ことから、本研究では、採石過程の再現性を損なわない範囲でゾーンを大きく設定し、1ゾーンの大きさを2m×2m×2mとして計算時間を短縮した。ここでゾーンとは、領域を分割した六面体要素の最小単位である。対象とする採石地下空間で採取された大谷石について、過去に実施された室内試験の結果(表-1)から物性値を算出し(表-2)、解析領域内のすべてのゾーンに入力した。地表面から深さ30mまでの地盤を等分布荷重として地質構造モデルの上面に載荷することでゾーン数を減らし、計算時間を短縮した。この地質構造モデルを、大谷採石地下空間断面図に基づい

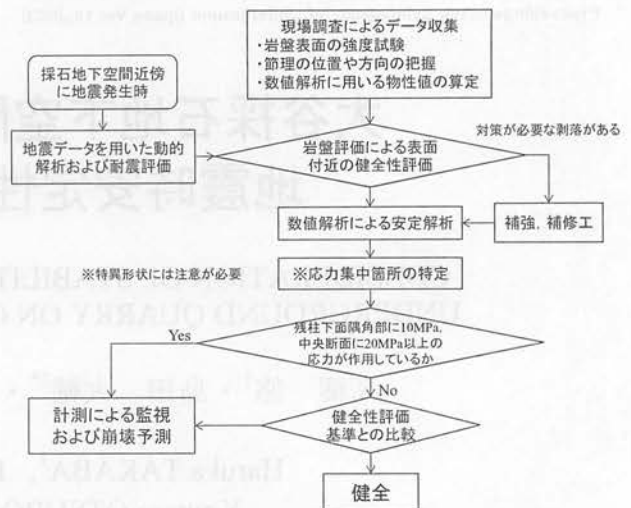


図-1 大谷採石地下空間の健全性評価フロー⁷⁾

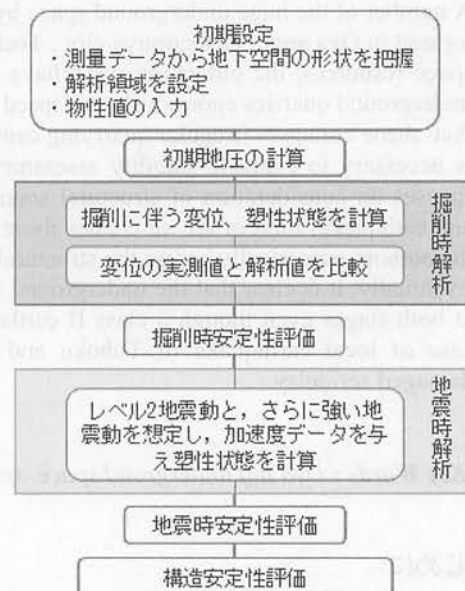


図-2 数値解析の流れ

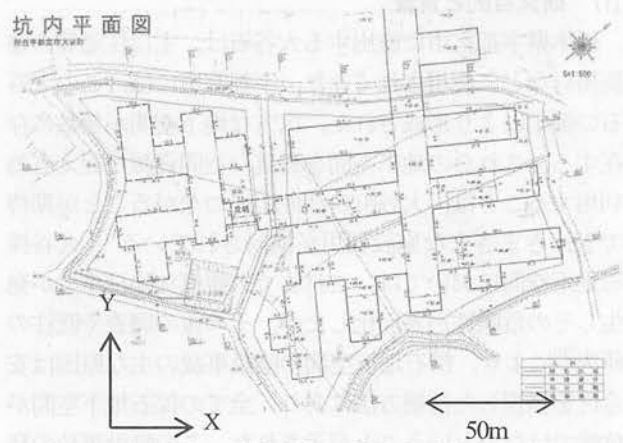


図-3 採石地下空間平面図

て、大谷石を採取した領域と採取予定の領域のゾーンを取り除く解析を順次行った。解析を行う際、天盤沈下量、壁面内空変位、地盤全体の塑性状態のゾーンを確認し、採石地下空間の掘削時構造安定性について検討した。

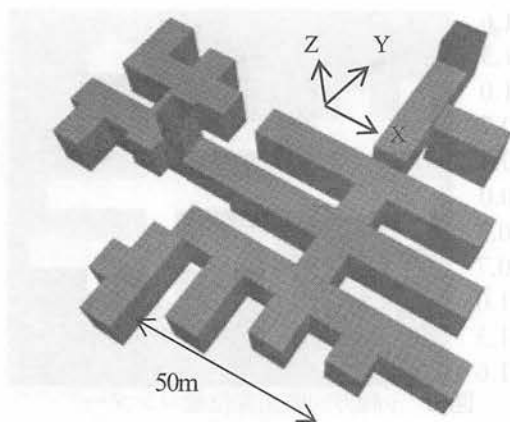


図-4 採石地下空間モデル図

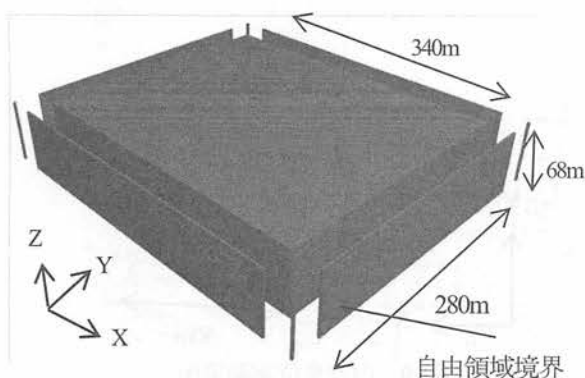


図-5 採石地下空間モデル領域

(3) 採石地下空間の地震応答解析について

本研究では、対象とした大谷採石地下空間モデル（図-4）にレベル2地震動が空洞直下で発生したと想定して、地震波を入力した。この結果をMohr-Coulombの弾塑性モデルを適用して、採石地下空間の塑性降伏の状態を確認した。この採石地下空間は340m×280m×68mの領域を持ち、809,200個の要素で構成されている。レベル2地震動の例として、2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震で観測された加速度データ(新潟県柏崎市観測所K-net: NIG018)¹²⁾を用いた。また、レベル2地震動よりさらに強い地震の例として、本研究では、未曾有の被害を引き起こした2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の加速度データ(宮城県牡鹿郡観測所K-netMYG011)¹²⁾を地震波として入力した。これらの加速度データは、採石地下空間モデルの底面に、地震データのN-S成分、E-W成分、U-D成分が実際の方角と一致するように、各成分をx軸方向、y軸方向、z軸方向に入力した。

この解析では、モデル領域の底面に加速度を与えるため、境界条件として、無限領域を再現する粘着性のダッシュポットで接続された自由領域境界を適用した（図-5）。ここに、減衰定数は、レイリーの減衰定数を用い、RC造の構造物における値⁹⁾($\alpha = 0.02 \sim 0.04$)および文献¹⁰⁾($\beta = 22.8$)を参考にして、 $\alpha = 0.05$ 、 $\beta = 22.8$ とした。

表-1 大谷石の室内物理・力学試験結果⁷⁾

見かけ比重	1.77
有効間隙率(%)	40.8
一軸圧縮強度(MPa)(kgf/cm ²)	8.09(82.5)
接線弾性係数(MPa)(kgf/cm ²)	0.31(3.11×10 ⁴)
割線弾性係数(MPa)(kgf/cm ²)	0.22(2.28×10 ⁴)
圧裂引張強度(MPa)(kgf/cm ²)	1.08(11.0)
粘着力C(MPa)(kgf/cm ²)	$C_{cu} = 2.10(21.4)$
	$C_{cd} = 2.31(23.5)$
P波速度(m/sec)	2.40×10^3
S波速度(m/sec)	1.23×10^3
ポアソン比	0.23
内部摩擦角 ϕ (°)	$\phi_{cu} = 31.3$
	$\phi_{cd} = 29.6$

表-2 解析に用いた大谷石の物性値一覧

体積弾性係数K(MPa)	1380
せん断弾性係数G(MPa)	910
粘着力C(MPa)	2.10
内部摩擦角 ϕ (°)	30
引張強度 σ_t (MPa)	1.08
密度 ρ_t (kg/m ³)	1770

3. まとめ

(1) 大谷採石地下空間の掘削時安定性

a) 掘削解析結果

測量データをもとに大谷石岩盤を再現した地質構造モデルを構築し、地質構造モデルからゾーンを取り除くことで採石地下空間を掘削する解析を行った。図-6、図-7、図-8は、地質構造モデルを平面で切り出した天盤沈下量、壁面の中央の高さにおける水平変位(x軸・y軸方向)のコンターを示す。なお、図-6中の黒い曲線は、地質構造モデルの断面を観察する際、ゾーンがわずかに変形しているために表示された線である。対象とした採石地下空間は、変位の最大値が天盤沈下量が約13mm(ひずみ0.06%)、壁面内空変位で約1.7mm(ひずみ0.024%)となった。また、図-9中に示す2箇所では採石地下空間内の採石に伴う壁面の内空変位を実測している。参考のため測線①における壁面の内空変位量を表-3に示す。なお、空洞内空を5回測定し、その平均値を測定値とした。解析結果の精度について検討するには計測回数が少ないが、空洞床面を40cm～80cm掘削した結果に対して、1.4mmの内空変位が表れている。数値解析においては、採石地下空間の全採石過程を一度に再現し計算を行ったため、単純に比較はできないが、壁面内空変位の解析値(1.7mm)は実測値に近いオーダーを示していると考えられる。今後、採石過程を詳細に再現した解析を行い、解析の妥当性についてさらに検討する。

b) 大谷採石地下空間の掘削時安定性評価

経験的な岩盤に関する知見¹¹⁾によれば、花崗岩などの比較的硬い連続した岩盤が破壊に近づくひずみは約0.1%であるといわれている。大谷石は堆積軟岩の一種であり、連続した大谷石岩盤が破壊に近づくひずみはこの0.1%よりも大きくなる。大谷石に関する試験結果¹³⁾から、大谷石が破壊に至るひずみは、0.5%～0.9%の範囲にあると考えられる。また、大谷石の一軸圧縮試験の結果をもとにすると、一軸圧縮強さに達した時の軸ひずみは0.5～0.7%付近である¹³⁾。本研究で対象とした採石地下空間の掘削後の天盤沈下量は、大谷石が破壊に至るひずみの約1/10、壁面のひずみで約1/20に収まり、降伏した箇所もみられなかったため、構造的に安定していると判断した。大谷石が破壊に至るひずみ0.5%～0.9%を掘削時安定性評価のしきい値として大谷採石地下空間の安定性評価フローに盛り込み、今後実際に崩壊した地下空間を対象として解析を行うなどし、このしきい値の妥当性についてさらに検討する。

表-3 壁面内空変位実測値 (測線①)

測定日	8/29	9/4	9/14	9/21
測定平均(m)	9.8232	9.8228	9.8226	9.8218
標準偏差(mm)	1.327	0.400	0.490	0.400
初期値との差(mm)	—	-0.4	-0.6	-1.4
前回測定値との差(mm)	—	-0.4	-0.2	-0.8
採石量(m ³)	—	20.0	26.64	25.26

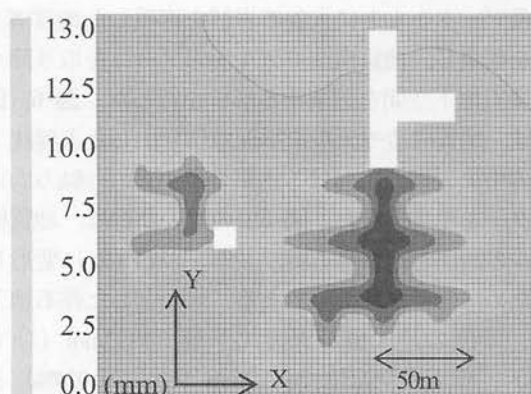


図-6 天盤沈下量コンター

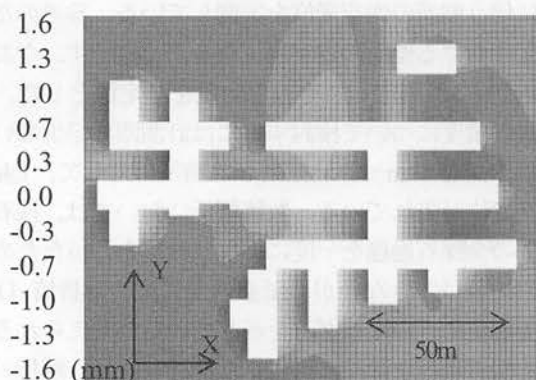


図-7 x軸方向壁面変位量コンター

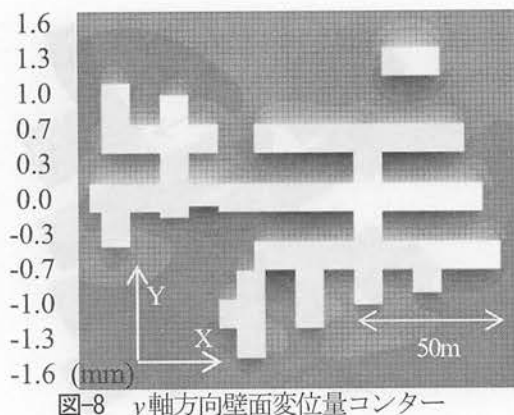


図-8 y軸方向壁面変位量コンター

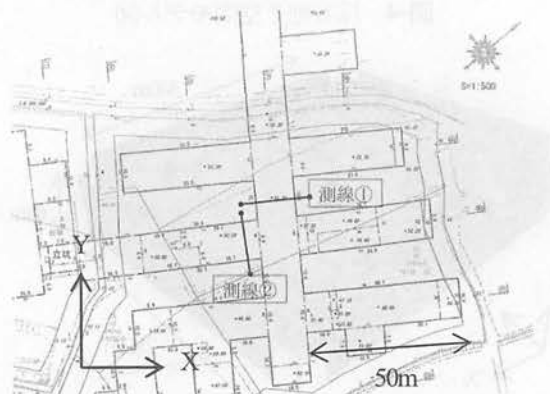


図-9 内空変位実測箇所

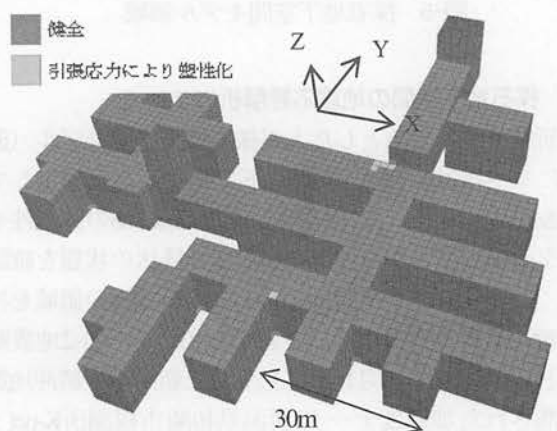


図-10 新潟県中越沖地震の地震波による採石地下空間塑性状態

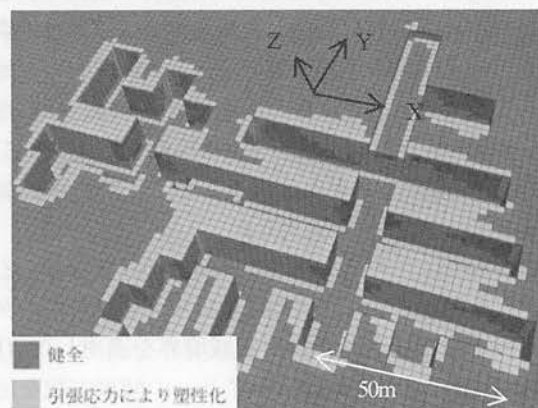


図-11 東北地方太平洋沖地震の地震波による採石地下空間塑性状態

(2) 大谷採石地下空間の地震時安定性評価

レベル2地震動を想定し、2007年に発生した新潟県中越沖地震の地震加速度（新潟県柏崎市観測所K-net：NIG018）¹²⁾を作用させた。地震動を与えた後の壁面と天盤のひずみを図-12、図-13、図-14に示す。掘削解析後のひずみと比較したところ、ひずみの最大値の変化は1/10000(%)程度であった。壁面と天盤および床面の隅角部において、引張応力によって岩盤が降伏している箇所がわずかに見られた（図-10）。この降伏範囲は表面的であり、壁面の内部までは降伏箇所がみられなかったため、地震動によって壁面や天盤が部分的に欠落する危険性はあるものの、この規模の地震動に対しては対象とした大谷採石地下空間自体が崩壊に至る可能性は低い。一方で、レベル2地震動よりさらに強い地震動を受けた例として、対象とする大谷採石地下空間に2011年東北地方太平洋沖地震の、震源から最も近い観測点(宮城県牡鹿郡観測所K-netMYG011)¹²⁾で観測された地震加速度を与えた。入力加速度を作用させた後の大谷採石地下空間の壁面と天盤のひずみを掘削解析後のひずみと比較すると、広範囲でひずみ値が大きくなっており、ひずみ値は最大で0.1%であった。図-11で天盤付近の採石地下空間内部の降伏範囲を確認した結果、壁面や天盤の広範囲で、降伏状態に達し応力を負担していない箇所がみられた（図-11）。地震動を受けた後の採石地下空間が構造的に支持するのかを検討するため、地震動を再現した動的解析後、採石地下空間の変位が収束するまで静的な解析を行った。その結果、変位は収束し、構造的に大きく崩壊することはなかったが、東北地方太平洋沖地震の地震波を用いた動的解析結果では、大谷石岩盤が破壊に至るひずみ（0.5%）に近いひずみ（0.1%）を示し、この規模の地震が大谷地域において直下で発生した場合、大谷石が降伏することで天盤や壁面が剥落する危険や、採石地下空間群が崩壊する可能性が示された。しかし、地下空間が地表面の構造物と比較して地震波による影響が小さい¹⁴⁾ことの考慮や、地震時解析後の静的な解析における採石地下空間の変形の進行と崩壊に至る過程の確認、実際に崩壊したケースの解析上における再現などを行い、地震時の安定性評価の基準についてはさらに検討する必要がある。

表-4 節理の有無による解析結果の比較

	節理なし	節理あり	解析結果の差
x軸方向変位 (mm)	5.5044	6.2051	0.7007
y軸方向変位 (mm)	5.9340	5.4105	-0.5235
z軸方向変位 (mm)	31.159	31.845	0.6860

4. 今後の課題

本研究で用いた地質構造モデルは、節理と呼ばれる岩盤中の亀裂が反映されていない。本研究で対象としたものとは異なる採石地下空間について、節理が解析結果に与える影響を検討するため、掘削後の壁面と天盤の変位の最大値を比較した（表-4）。その結果、節理を地質構造モデルに反映した場合でも壁面の内空変位の増加は1mm未満となり、節理の影響は小さいことが示された。今後、対象とした採石地下空間について、現地調査により把握した節理の位置、走向（図-15）などを反映させた解析を行い、どの程度解析結果に影響を与えるか検討する。

対象とした空間内の2箇所、壁面の内空変位を計測中である（図-9）。実測した変位と解析値を比較し、解析がどの程度正確に採石地下空間の変形を表しているか検討する。

さらに本研究では、大谷採石地下空間の安全性評価手法に感性工学的な観点¹⁵⁾による第三者に対する安全性評価を取り入れることを目的として、アンケートによる調査を実施する予定である。

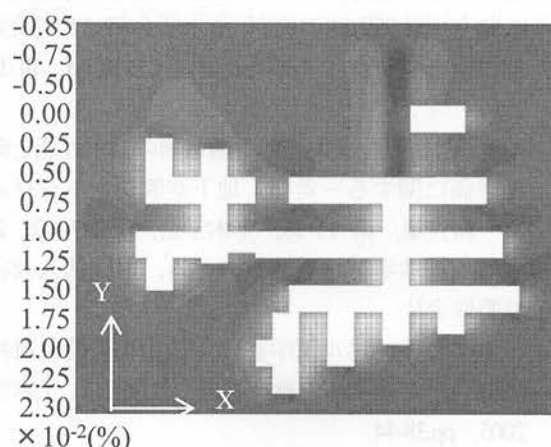


図-12 新潟県中越沖地震を用いた解析結果
(x軸方向ひずみコンター)

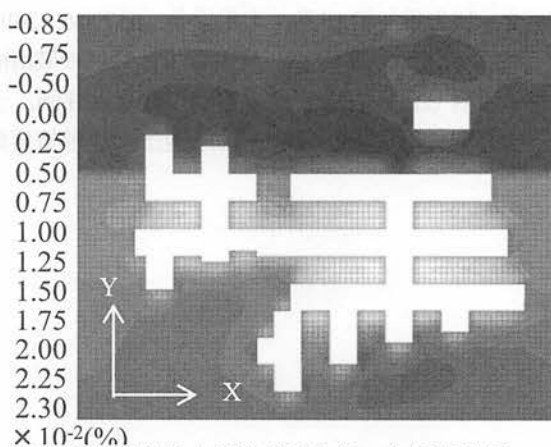


図-13 新潟県中越沖地震を用いた解析結果
(y軸方向ひずみコンター)

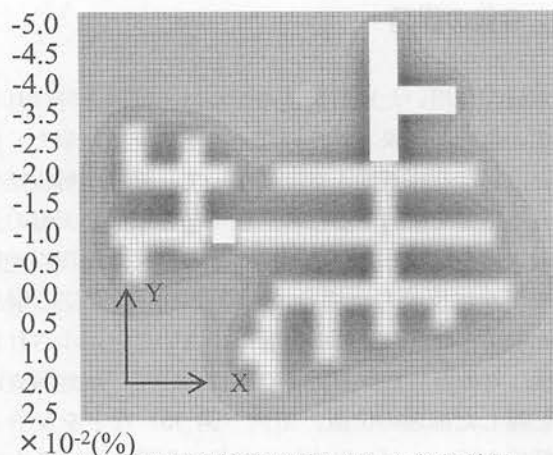


図-14 新潟県中越沖地震を用いた解析結果
(z軸方向ひずみコンター)

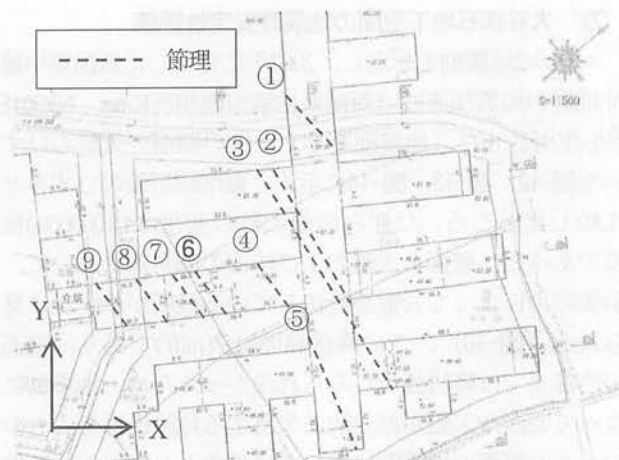


図-15 採石地下空間内の節理の位置・走向

参考文献

- 1) 井上 達也, 早坂 晃, 阿部 友哉, 清木 隆文, 熱負荷推定に基づいた大谷採石地下空間の長期的な利用に関する検討, 地下シンポジウム論文・報告集, 第17巻, 土木学会, pp.211-216, 2012.
- 2) 樋口 大樹, 清木 隆文, 大谷石採石地下空間における健全性評価方法の検討, 土木学会第 37 回関東支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, III-13, 2010.
- 3) 池尻 健, 笹尾 春夫, 地下構造物の要求性能と健全度評価に関する一考察, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 13 巻, 土木学会, pp.237-242, 2008.
- 4) 大谷石採取場跡地観測システム, 財団法人大谷地域整備会社
- 5) 土木学会トンネル工学委員会 技術小委員会 維持管理部会, トンネルの維持管理, 社団法人 土木学会, 2005, pp.38-44,
- 6) 大西 有三, 小山 倫史, 安田 亨, 道路トンネルの健全性評価技術に関する検討, 地下シンポジウム論文・報告集, 第 15 巻, 土木学会, pp.79-86, 2010.
- 7) 大坪 孝太郎, 高葉 悠, 清木 隆文, 残柱の破壊機構に着目した大谷採石地下空間の健全性評価, 土木学会第 39 回関東支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, I-38, 2012.
- 8) 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.
- 9) 山崎 靖典, 実在超高層建物の固有周期と減衰定数の設計値と実測値に関する研究
- 10) Itasca 社, FLAC3D Version4.0 Dynamic Analysis
- 11) 日比野 敏, 技術者に必要な岩盤の知識, 鹿島出版会, 2007, pp.102-103.
- 12) 防災科学技術研究所強震ネットワーク K-NET : <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>, (2011 年 9 月確認).
- 13) 伊藤 糾次, 早稲田大学理工学研究所受託研究報告書, 第 2 号, 早稲田大学理工学研究所, 1973, pp.12-37.
- 14) 立川 剛, 八尾 誠, 栗原 一三, 宿里 勝信, 中野 真司, 地下構造物の耐震性評価に関する一考察, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 36 号, pp 249-252, 1998
- 15) 今泉 暁音, 近江 桃, 向井 かおり, 清水 則一, 色と形が地下空間イメージに与える影響に関する考察, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 17 巻, 土木学会, pp.51-56, 2012

採石地下空間	大谷石	大谷石	大谷石
7005.0	1832.0	4402.2	10000.0 (mm)
2522.0	2501.2	10402.2	20000.0 (mm)
6000.0	2182.1	9811.1	25000.0 (mm)