

大谷石採石地下空間の構造再現と掘削時および地震時安定性の検討

MODELLING OF STRUCTURE REAPPEARANCE OF OYA TUFF UNDERGROUND MINE AND RESEARCH FOR MINING AND SEISMIC STABILITY ASSESSMENT

高葉 悠^{1*}・清木 隆文²・大坪 幸太郎³

Since the large-scale collapse of Oya tuff mines occurred at Oya area, Utsunomiya city, Tochigi prefecture around 1990, it has been considered that the underground space are danger to utilize. However, recently it is realized that those collapsed ones may be mined out of the quarrying act. And as the underground spaces excavated in regular way are necessary to secure the residential people in this area this study focus on consideration of structural soundness to utilize Oya tuff mine at mining stage and seismic state. First of all this study 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 mine is structurally stable in mining and seismic stage 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 mine will be seriously damaged.

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

1. はじめに

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として使用されてきた。現在でも数か所で地下採石が行われている。しかし大谷町では、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¹⁾。

一方で公共施設の視点からすると地下構造物は、維持管理を実施するために、対象構造物の要求性能を明確にする必要があり、その抽出の仕方にも様々な研究が行われている³⁾。その明確にされた要求性能で山岳トンネル（道路及び鉄道トンネル）の照査可能な健全度評価法を確立する研究³⁾がなされ、健全度はトンネルの一般的な維持管理のフロー(図-1)に示す一次点検および二次点検の結果に基づいて道路トンネル（一般国道、高速道路）および鉄道トンネルそれぞれの評価方法によって評価さ

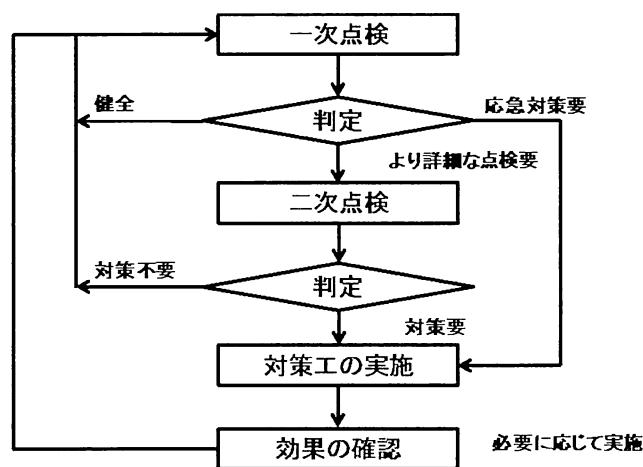


図-1 トンネルにおける一般的な維持管理のフロー³⁾

れる。また、樋口²⁾により、現場調査による岩盤分類および数値解析を組み合わせで作成した大谷石採石地下空間における健全性評価方法のフローチャート(図-2)が提案された。

キーワード：大谷石、地下空間、安定性、掘削、耐震性

¹学生会員 宇都宮大学工学部 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2), E-mail: mtl16429@cc.utsunomiya-u.ac.jp

²正会員 宇都宮大学大学院 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

³非会員 宇都宮大学工学部 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

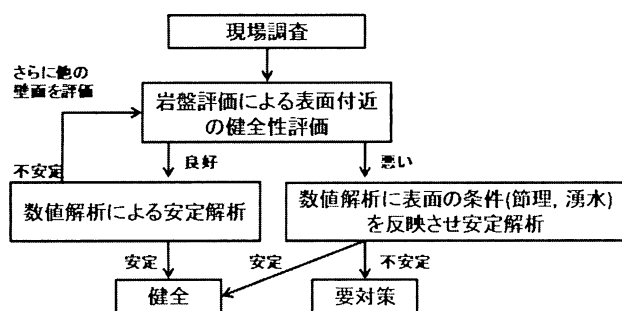


図-2 大谷採石地下空間の健全性評価フロー³⁾

2. 大谷石採石地下空間の3次元安定解析

大谷石は現在機械によって切り出されており、その採石形態は図-3のような溝を裁断機によってつけ、「矢じめ」というつるはしの一種である道具でその根元を叩き、石を起こすことで採石を行う。本研究では、採石地下空間の3次元安定解析をFLAC3Dを用いて行った。三次元の掘削解析を実施するために、採石で切り出される石材は、ゾーンの大きさで再現されるので石材の大きさに合わせて1ゾーンずつ取り除くことが適当である。しかし、この採掘方法を厳密に再現する解析ステップを採択することは、莫大な計算時間とコマンドバッチの準備に多大な手間がかかることを意味する。松枝⁴⁾は大谷石採石地下空間における掘削手順を2次元の確率有限要素法解析において簡略化することを目的に、一度の採石ステップ掘削量を変化させ、掘削手順の違いが最終掘削後の結果に及ぼす影響を検討した。この検討結果により、対象とした大谷石採石地下空間では、掘削ゾーンの大きさがある程度大きくとも破壊確率に与える影響は小さいことを明らかにしている。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。簡単な解析の流れを図-4に示す。また本研究では、地表面から約10mの粘土などで構成される土被り部分を掘削する際の立坑内へのコンクリート擁壁の吹き付けを再現するため、未固結層の代表的な土質として、関東ロームの材料定数を設定した。また、掘削後、立坑内周辺の地山にコンクリートの材料定数を与えて、コンクリート擁壁を再現し解析を行った。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、FLAC3Dは有限差分法による解析ツールであるため、応力ひずみ関係を得るために運動方程式を解き、速度変位（速度の増分）を未知量とするためである。

3. 大谷石採石地下空間の採石時安定性評価

(1) 解析方法

安定性解析の対象とした大谷石採石地下空間の形状を図-5に示す。このモデルは、150m×150m×60mの解析領域を持ち、1ゾーン(要素)1.5m×1.5m×1.5mの400,000個で構成されている。なお、対象とした大谷石採石地下空間では、高さが一辺1.5mの空間もあるため、ゾーンの大きさが掘削解析へ与える影響をより小さくし、詳細に解析を行うために、本研究では一つのゾーンの寸法を1.5m×1.5m×1.5mの立方体とした。また、地表面から10mの粘土質の未固結の層を再現するために、地表面から12mの深さまでの要素に、この代表値として、関東ロームの物性値を与えた。この未固結の層に立坑を掘削する際、コンクリート擁壁の打設を再現するために、掘削した立坑の周りの関東ロームの物性値をコンクリートの物性値に変更した。本研究で用いた大谷石、関東ローム、コンクリートの物性値を表-1に示す。なお、実際に数値解析を行う際、対象とした採石地下空間を28個の直方体のブロックに分割し、実際に掘削する順序を想定し、立坑に近いブロックからブロック毎に計算が収束するまで解析を行った。また、この採石地下空間の湧水はわずかであるので、本研究では問題の簡略化のために、地下水を考慮しない全応力解析を実施する。

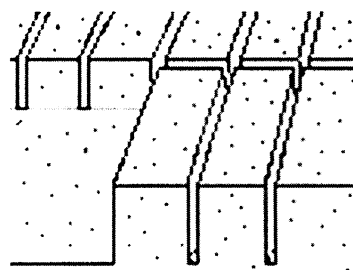


図-3 大谷石の採石形態

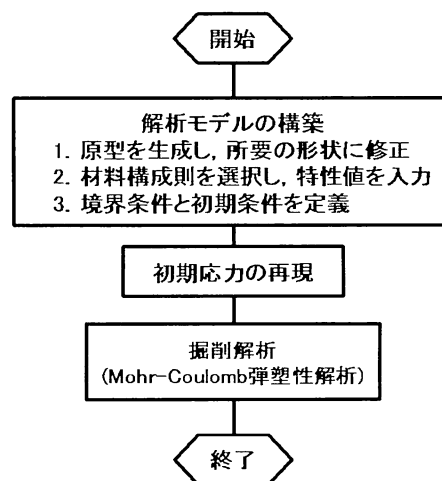


図-4 数値解析の流れ

表-1 用いた物性値¹⁾⁵⁾⁶⁾

	体積弾性係数 (MPa)	せん断弾性係数 (MPa)	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (°)	引張強度 (MPa)	密度 (kg/m ³)
関東ローム	1.6×10^2	17	1.5×10^{-2}	40	1.6×10^{-2}	1.4×10^3
大谷石	6.7×10^2	5.2×10^2	2.9	29.6	1.6	1.8×10^3
コンクリート	7.0×10^3	6.0×10^3	2.9	45	3.7	2.3×10^3

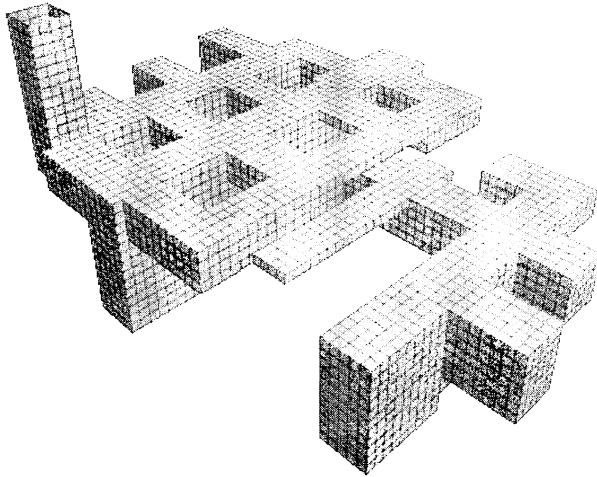


図-5 地下空間モデル図

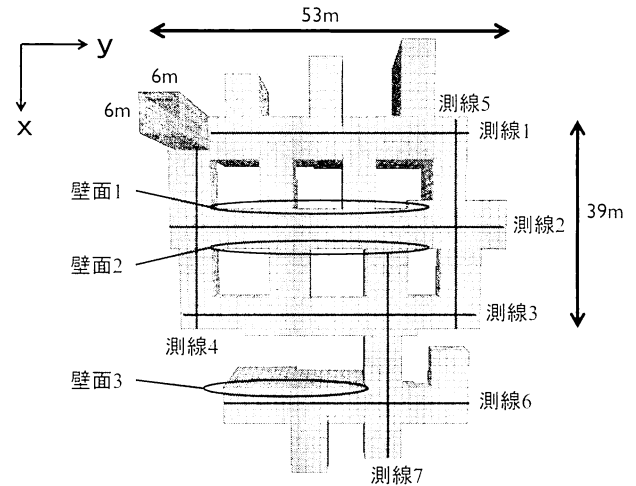


図-6 採石地下空間内の変位測定箇所

(2) 解析結果

対象とした採石地下空間から、測線1～測線7(図-6の直線)の天端沈下量と壁面1～3の内空変位(図-6)を抽出しそれぞれの測線における変位の最大値と内空ひずみを表-2に示す。天端沈下量は最大で約27mm、壁面の内空変位が最大で約1.5mmであり、壁面1、壁面2の内空変位は採石地下空間内向きに変位している。測線3においてひずみが大きくなったのは、測線3の空洞の高さが1.5mであり、他の測線の空洞高さよりも低いためである。全体的にひずみがかなり小さくなり、塑性化している箇所は地表面でごくわずかであったため、採石地下空間は構造的に安定している。

(3) 節理を考慮した採石地下空間の3次元解析

大谷石採石地下空間には通し傷と呼ばれ残柱を突き抜ける節理が存在する。現場調査⁷⁾によって得られた節理の方向、場所等を確認した平面図(図-7)をもとに、地下空間内の残柱に図-8中の点線で示すように節理を設定した。なお、節理面の傾斜は90°(鉛直)とした。本研究では、表-3のように、図-8に示した節理が通るゾーンの見かけの弾性係数をに算出した場合と、弾性係数を極端に低下させた場合(健全な大谷石の1/100の値)について掘削解析を行い、節理が存在しない場合の解析結果と比較することで、節理が与える影響について検討した。図-8

表-2 各測線における変位の最大値

変位の測線	変位の最大値 (mm)	ひずみ (%)
測線 1	26.46	0.147
測線 2	27.34	0.137
測線 3	25.78	1.719
測線 4	24.51	0.409
測線 5	27.03	0.601
測線 6	23.91	0.319
測線 7	23.93	0.319
壁面 1	1.45	0.019
壁面 2	1.531	0.020
壁面 3	0.586	0.008

中の測線2, 3, 4, 5, 7と壁面1～3の節理を考慮する場合と考慮しない場合の変位の絶対値の差をとり、それぞれの測線における差の最大値を表-4に示し、それぞれの測線で最大値をとる箇所を図-9の点で示す。表-4から、節理が残柱にかなり危険な状況に入っている場合でも、解析結果は最大で2.28mm程度しか大きくならない。このため、採石地下空間に節理が与える影響は小さいと考えられる。

表-3 節理を考慮する場合の大谷石の物性値

	節理を考慮しない	節理を考慮する	節理を考慮する (弾性係数 1/100)
体積弾性係数(MPa)	6.7×10^2	3.4×10^2	6.7
せん断弾性係数(MPa)	5.2×10^2	1.3×10^2	5.2
粘着力(MPa)	2.9	2.9	2.9
内部摩擦角(°)	29.6	29.6	29.6
引張強度(MPa)	1.6	1.6	1.6
密度(kg/m ³)	1834.9	1834.9	1834.9

表-4 節理を考慮した場合としない場合の変位の差

計測点	変位の差の最大値 (mm)	変位の差の最大値 (mm) (弾性係数 1/100)
測線 2	1.53	2.28
測線 3	1.25	1.82
測線 4	0.82	1.34
測線 5	1.37	2.05
測線 7	1.26	1.86
壁面 1	0.14	0.21
壁面 2	0.20	0.67
壁面 3	0.02	0.34

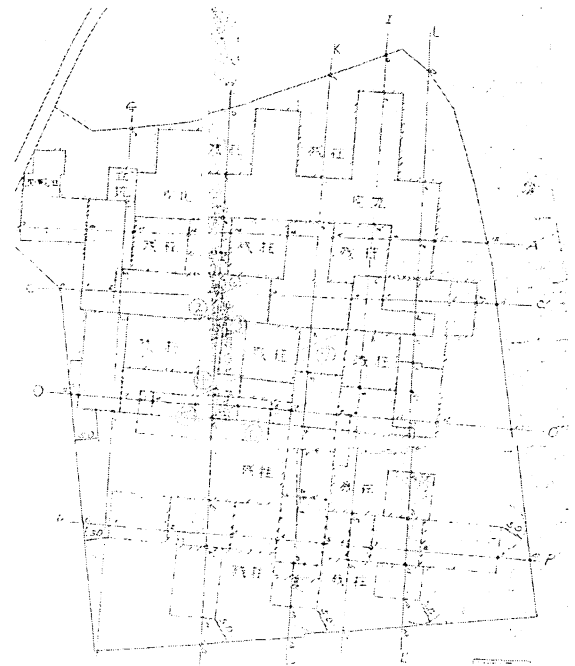


図-7 採石場平面図で確認した節理の位置

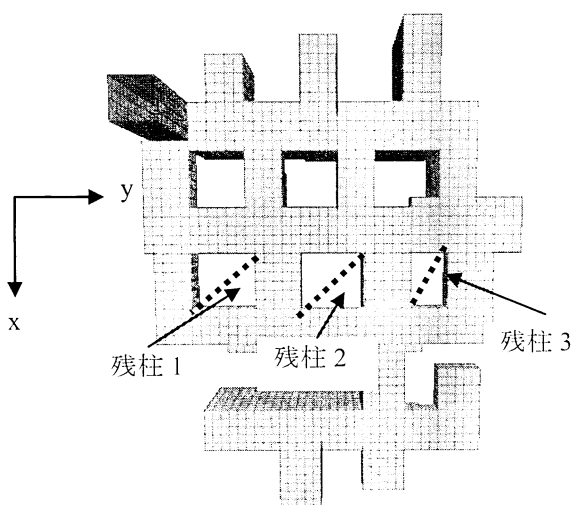


図-8 数値解析で再現した節理の位置

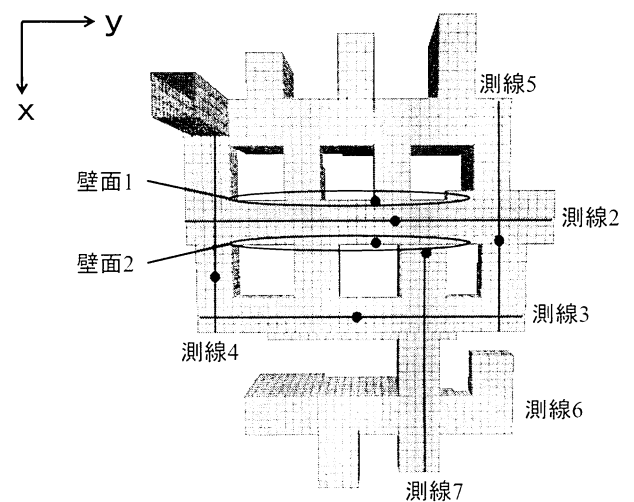


図-9 節理の影響が大きい箇所

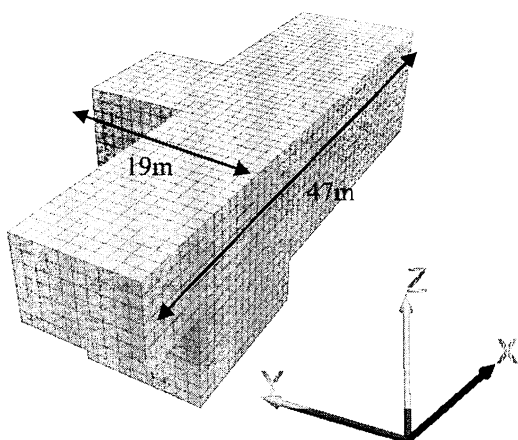


表-5 各断面の変位の解析値と実測値

断面	変位解析値 (mm)	変位実測値 (mm)
A-A'断面	0.1643	1～2
B-B'断面	0.2239	1～2
C-C'断面	0.0984	1～2
D-D'断面	0.2169	1～2
E-E'断面	0.8974	1～2
F-F'断面	1.0297	1～4

図-11 実測値と比較するための地下空間モデルの外観

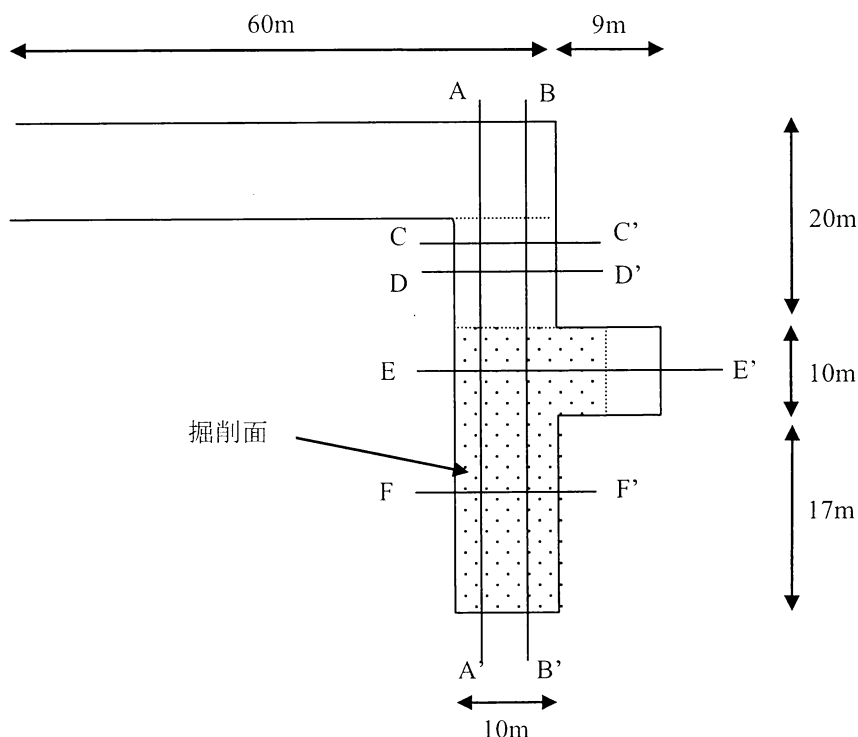


図-10 採石時の内空変位測定箇所

4. 数値解析の結果と実測値との比較

(1) 解析方法

既往の研究⁸⁾では、実際に大谷石の採掘を行っている空洞において、採石が進行するに伴って発生する変位を測定している。空洞内で採石による掘削が進行している地下空間の構造は図-10のようになり、測定する内空の測線は6箇所に定め、壁面高さのほぼ中央部分の変位の測定を行った。また、変位測定中の実際の掘削は図-11に示す掘削面を40cm×30cm×90cmのブロック毎に取り除くことで進行している。本節では、変位を測定した採石地下空間を数値解析で再現し掘削解析を行い、実測値と

解析値とを比較し、数値解析の結果がどの程度詳細に採石地下空間の構造や安定性を再現できているか確認する。また、図-10をもとに再現した採石地下空間の形状を図-11に示す。このモデルは110m×80m×58mの領域を持ち、1ゾーン1m×1m×1mの大谷石の物性値を持つ要素体510,400個で構成されている。この要素体の初期地圧を計算した後、図-11に示す地下空間を地表面から28mの深さに掘削し、解析を計算が収束するまで行う。解析における掘削は計算過程を簡単にするため、模式的に掘削面を段階的に深さ1mずつ5mにわたって掘削する。

(2) 解析結果

解析結果と実測値を表-5に示す。F-F'断面を除き、全体的に実測値に比較して解析値は小さくなった。F-F'断面の変位は、実測値に近いオーダーを示したが、これは掘削した領域がF-F'の真下にあったからである。掘削領域から遠い断面では解析値が小さくなったが、誤差が1mm未満に収まっていることから、数値解析は、ある程度正確に採石地下空間の変形を表している。

5. 大谷石採石地下空間の地震応答解析

(1) 解析方法

本研究で対象とした大谷石採石地下空間モデル(図-5)に直下型の地震が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150m×150m×60mの領域を持ち、400,000個の要素で構成されている。レベル2地震の例として、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(柏崎市で測定)を代入した。また、レベル2地震よりさらに強い地震の例として、未曾有の被害を引き起こした2011年3月11日に発生した東北沖地方太平洋沖地震の加速度データ(宮城県牡鹿郡で測定)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-12)。ここに、減衰定数は、レイリーの減衰定数を用いて、RC造の構造物における値($\alpha=0.02\sim0.04$)およびFLAC3Dのマニュアル($\beta=22.8$)を参考にして、 $\alpha=0.05$ 、 $\beta=22.8$ とした。

参考のために、新潟県中越沖地震において観測された加速度データ⁹⁾を図-13、4段階の減衰比hに対する応答スペクトルを図-14に示し、東北地方太平洋沖地震で観測された加速度データ、応答スペクトルをそれぞれ図-15、図-16に示す。二つの地震応答スペクトルを比較すると、新潟県中越沖地震は0.4(Hz)以上の周波数が卓越し、応答値約1000(gal)を示し、東北地方太平洋沖地震は1.1(Hz)以上の周波数が卓越した応答値10000(gal)～30000(gal)を示す。東北地方太平洋沖地震は周期の短い地震波が特に卓越しており、このために地震動による構造物の被害は比較的小さかったものの、プレート境界で発生したため、巨大な津波が発生した。

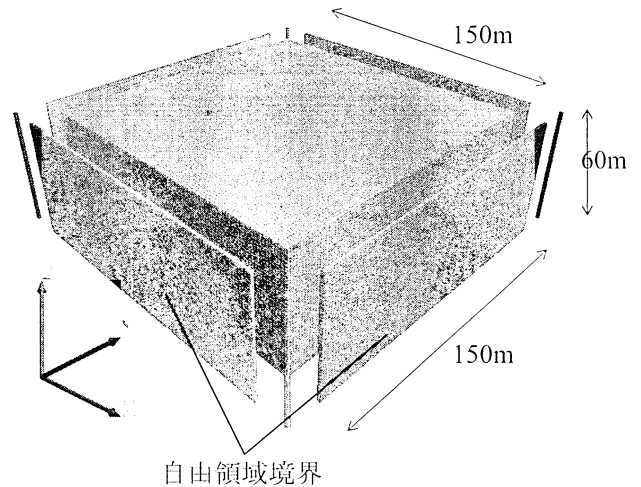


図-12 採石地下空間モデル領域

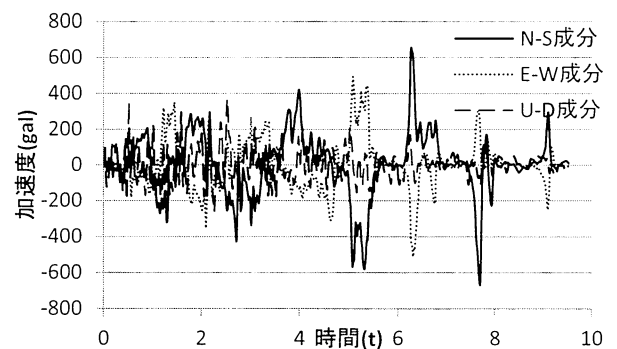


図-13 新潟県中越沖地震加速度データ

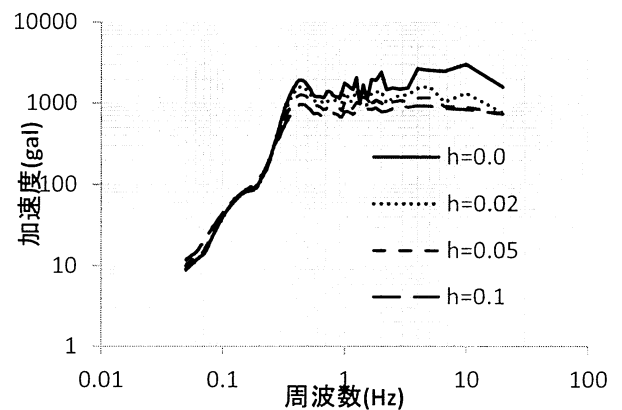


図-14 新潟県中越沖地震応答スペクトル

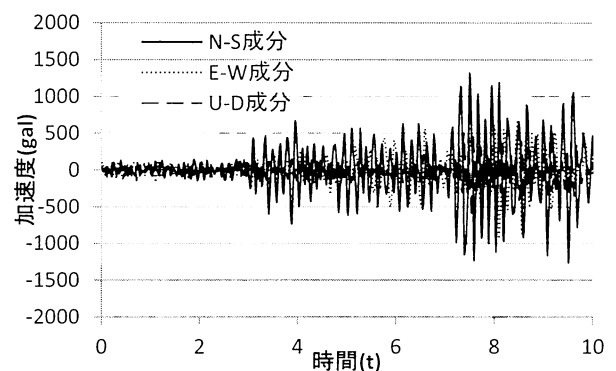


図-15 東北地方太平洋沖地震加速度データ

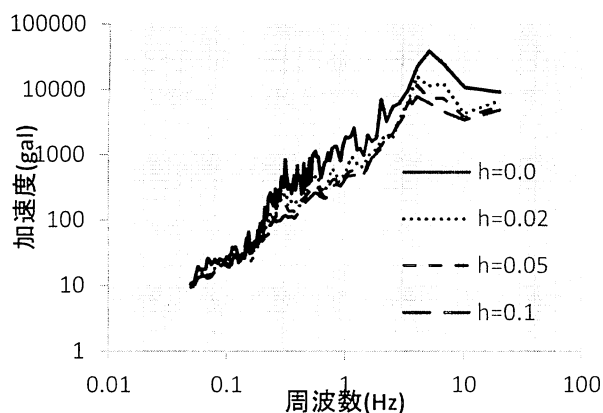


図-16 東北地方太平洋沖地震応答スペクトル

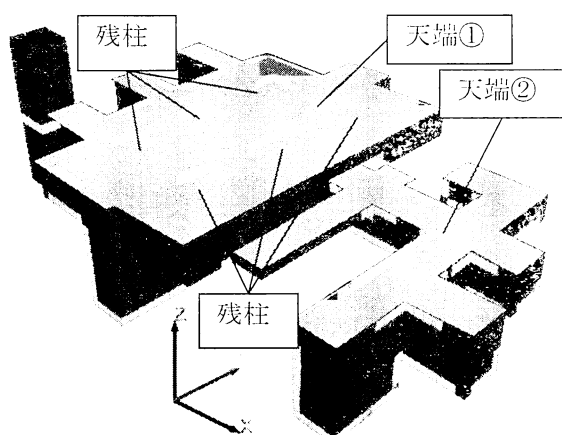


図-17 新潟県中越沖地震の加速度データによる採石地下空間塑性状態

(2) 解析結果

新潟県中越沖地震の加速度データを与えた後の採石地下空間の塑性状態を確認した(図-17)。その結果、壁面と天端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多く見られた(図-17の白色部)。また、図-17中の天端①、②を切り取り、水平方向にどの程度降伏範囲が広がっているか確認したところ、降伏範囲は大きい箇所では3mの厚さで壁面が塑性化しているだけであった。この影響は表面的であるため、新潟県中越沖地震の地震動によって壁面や天端が表面的に欠落する危険性はあるが、この大谷石採石地下空間自体が破壊に至る可能性は低い。

この他に、東北地方太平洋沖地震と同程度の地震が採石地下空間直下に発生することを想定し、その加速度データを与えた後の地下空間の塑性降伏状態を整理した。本研究では、代表的な例として、地表面からそれぞれ20mと26mの深さで水平方向に切断

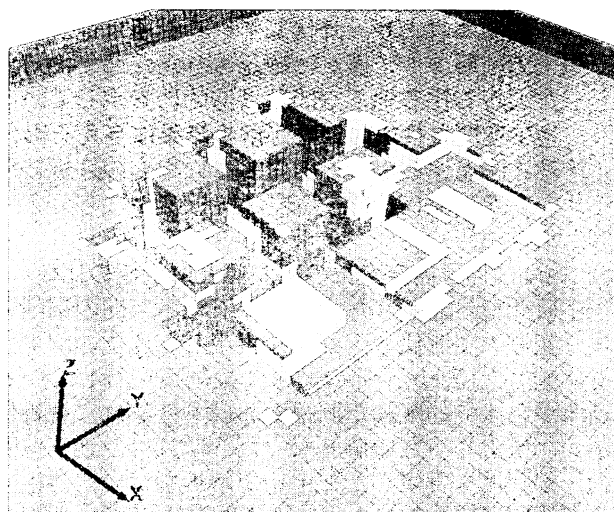


図-18 解析結果の深さ 20m における水平断面図 (東北地方太平洋沖地震を入力)

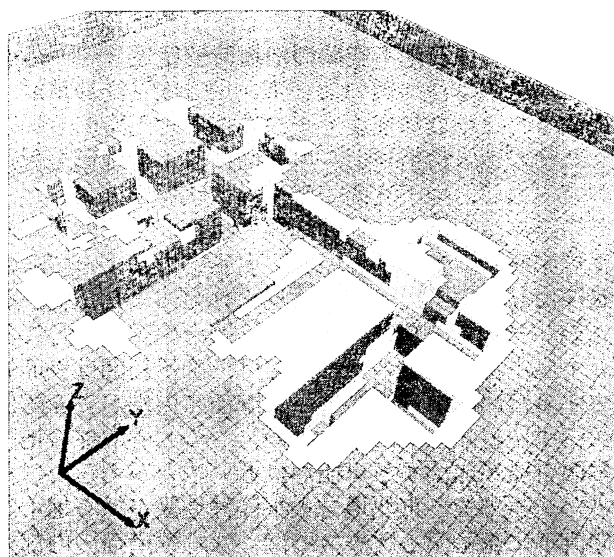


図-19 解析結果の深さ 26m における水平断面図 (東北地方太平洋沖地震を入力)

した断面で、降伏状態を確認した(図-19、図-20)。この結果から、残柱や壁面の内部は塑性降伏している様子が確認され、中越沖地震よりも強い地震動により、採石地下空間は破壊に至る可能性があることを示す。

6. まとめと今後の課題

(1) まとめ

本研究では、FLAC3D(有限差分法による3次元構造解析ソフト)を用いて、採石場の測量断面図を基にして、大谷石採石地下空間を再現した。このモデルを用いて、大谷石採石地下空間の安定性に関する以下の項目について検討した。

a) 大谷石採石地下空間の掘削時安定性

採石地下空間を28個のブロックに分割し、ブロック毎に掘削解析を行った。その結果、変位の最大値

が弾性範囲に収まり、降伏している箇所は地表面近くの未固結層のみで僅かに確認されただけで、対象とした大谷石採石地下空間は構造的に安定している。

b) 地下空間残柱内の節理が解析結果に与える影響

節理を考慮する場合と考慮しない場合の解析結果を比較した結果(表-4)、節理は解析結果に与える影響が小さい。

c) 掘削に伴う内空変位の実測値と解析値の比較

本研究で対象とした大谷石採石地下空間の掘削に伴う変位の実測値と、掘削を再現した変位の解析値を比較した(表-5)。その結果、掘削が進行している箇所から比較的離れた測線における変位は、解析値が実測値より小さい値となった。これは、地下空間の一部だけを再現したモデルで解析を行い、隣接する空間の影響を受けなかったためであるが、掘削が進行している箇所付近では、解析値が実測値に近いオーダーを示したため、数値解析はある程度正確に採石地下空間の変形を表している。

d) 大谷石採石地下空間の地震時安定性

新潟県中越沖地震および東北地方太平洋沖地震で観測された地震加速度データを採石地下空間を掘削した後の地質構造モデルの底面に直下型地震を想定して入力し、地下空間の塑性降伏状態を確認した。その結果、新潟県中越沖地震の場合、壁面と天端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多く見られた。また、それぞれのケースで、塑性降伏した範囲を確認したところ、新潟県中越沖地震のケースでは、降伏範囲は表面的であるため、地震動によって壁面や天端が表面的に欠落する危険性はあるものの、この大谷石採石地下空間自体が崩壊する可能性は低いことが明らかになった。一方で、東北地方太平洋沖地震が採石地下空間直下に発生するケースでは、残柱や壁面の内部まで塑性降伏状態が見られ、この規模の地震が大谷地域に発生した場合、採石地下空間群が崩壊する可能性があることを示した。

(2) 今後の課題

本研究で行った採石地下空間の掘削解析では、1ゾーン1.5m×1.5m×1.5mの立方体によって解析領域を構成し、数値解析を行った。しかしながら、実際の掘削作業では、大谷石を30cm×40cm×90cmの大きさのブロックに切り出して行うため、さらに詳細の解析を行う場合、地質構造モデルを構成するゾー

ンをこのブロックと同じ大きさに設定することが望ましい。また、節理が通るゾーンの弾性係数を低下させることで、地下空間内の節理を再現したが、この方法では十分とは言えず、節理を平面として再現し、この面に沿って剥離や滑動が起こるモデルを構築する。

2011年3月の東北地方太平洋沖地震の発生により、社会的に構造物の耐震性を見直す気運が高まってきている。本研究で対象とした以外の採石地下空間に対しても、耐震性を含めた地下空間の安定性評価をすすめる。

参考文献

- 1) 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
- 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，2ps，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) 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.
- 5) 村田 二郎，長瀧 重義，菊川 浩治：建設材料コンクリート，共立出版，pp.119-137，2008。
- 6) 河上 房義：土質力学，森北出版，2008
- 7) 鈴木知洋，清木隆文：岩盤分類に基づく大谷石採石地下空間の健全性評価に関する研究，土木学会第36回関東支部技術研究発表会講演概要集，2ps，CD-ROM，III-18，2009。
- 8) 清木隆文，江守太一郎，アイダン・オメル：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－大谷採石跡地下空間について－，地下空間シンポジウム論文・報告集，第10巻，土木学会，pp.79-88，2005。
- 9) 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)。