地震時における大谷採石地下空間の 安全性評価に関する検討

石井 智章1・清木 隆文2*・多田 海成3

1字都宮市役所(〒320-8540栃木県宇都宮市旭1丁目1番5号) 2字都宮大学大学院准教授(〒321-8585栃木県宇都宮市陽東7丁目-1番2号) 3四日市市役所(〒510-8601三重県四日市市諏訪町1番5号) *E-mail:tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

宇都宮市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、これにより、採掘後の地下空間の埋め戻しが強く主張されてきた.これらの事故の経緯により、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地震時の挙動を再 現し安全性、耐震性を確認することを目的として、現地調査及び、栃木県宇都宮市にある大谷採石地下空 間の構造を再現した3次元数値解析を行った.この空間にとって最も影響を及ぼす地震の卓越周波数に着 目して、地下空間の地震時の安全性に関する検討を行った.また、数値解析結果と危険判定士の方々から 得た知見を参考に作成された大谷採石地下空間のための安全性評価項目を更新した.

Key Words : Oya tuff, underground quarry, seismic responce, safety assessment

1. はじめに

栃木県宇都宮市大谷町では、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、大谷地域整備公社 を設立し、大谷採石場跡地に小型地震計を設置して陥没 の前兆を捕える試みを行っている. 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⁾. また, 樋口ら ³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て作成した大谷採石地下空間にお ける健全性評価方法のフローチャートが提案され、高葉 ら 3)により、大谷採石地下空間を対象とした現地調査お よび数値解析を組み合わせた、掘削時、地震時の安全性 評価手法が提案された. また, 感性工学的な観点を取り 入れた第三者に対する安全性評価の検討も行っている. さらに、Seiki et al.4は、解析の際、死荷重で設定した場合 と活荷重で設定した場合とでは解析の結果、双方に大差 はないとした. この空間にとって最も影響を及ぼす地震 の卓越周波数に着目して、地下空間の地震時の安全性に 関する検討を行う.また、数値解析結果と危険判定士の 方々から得た知見を参考に、大谷採石地下空間における 安全性評価項目を作成する.

2. 大谷採石地下空間の地震時応答解析

(1) 動的解析の2次元モデルへの適用

本章では採石地下空間に最も不利な振動を与えると考 えられる地震波データを選定するために、大谷採石地下 空間の固有周期を明らかにすることを目標とする.本節 では山岳トンネルにおける解析手法⁵を参考にし、簡単 な2次元モデルを用いて解析を行い、地震発生時の安全 性評価の手法の確立を試みる.なお、一連の解析は Flac3D(Itasca社)で行った.

解析モデルは60m四方の領域を持ち、1ゾーンの大き



図-1 2次元の大谷採石地下空間解析モデル

表-1 本解析で用いた物性値 6

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p _t (kg/m ³)	1770



図-3 再現した大谷採石地下空間の解析領域

さは 1 m 四方で構成した(図-1). 解析は弾性体および Mohr-Coulombの弾完全塑性破壊規準に従った弾塑性体の モデルで行った. 解析を行う際には、粘性を持つダッシ ュポットで接続された自由領域境界をモデル側面に設定 し, 無限領域を再現した. また, 地表面からの反射を無 視できる静的境界を上面に設定した. 今回の解析で用い た物性値は、過去に実施した室内試験の結果を参考に用 い,解析を実施した.入力正弦波の周波数は,速度の振 幅 0.75m/sにおいては、周波数 f=1.0Hz, f=2.5Hz, f=3.0 Hz, f=3.5 Hz, f=4.0 Hzの計5段階,速度の振幅1.0 m/s においては、f=1.0Hz、f=2.5Hz、f=3.0Hz、f=3.5Hz、f= 4.0 Hz, f=4.5 Hzの計6段階, さらに速度の振幅 1.25 m/s では、f=1.0Hz, f=4.0Hz, f=4.5Hz, f=5.0Hz, f=5.5Hz の計5段階とした.これらの周波数は、既往の研究によ り、本節でモデル化した採石地下空間が最も不利となる 入力地震波の周波数が f=2.5 Hz~ 5.0Hz 付近であると示 されていること、地震波の速度スペクトルの卓越周波数 がf=1.0Hz~3.0Hz程度であると考えられること、また、 一般に高い周波数であるほど動的解析と静的解析の解析 結果に差異が生じることから設定した. 解析を行った結 果,速度振幅 0.75 m/s においては、f=2.5 Hz~f=3.5 Hz 周 辺, 速度振幅 1.0 m/s では f=3.5 Hz~f=4.5 Hz 周辺, そし て速度振幅 1.25 m/s では f=4.5 Hz ~ f=5.0 Hz 周辺で塑性 領域が最も大きく拡大し(図-2,表-2),以上の周波数が 今回モデル化した形状が最も危険になる固有周波数であ

(2) 地形地質情報の解析モデルへの反映

ると考えた.

対象とした大谷採石地下空間の解析モデル(図-3)は, 340m×330m×68mの領域を持ち,2m×2m×2mのゾー



図-2 2次元大谷採石地下空間モデルのゾーン配置

表-2 各速度の振幅で推定された固有周波数

速度振幅 (m/s)	固有 周波数	破壊現象	塑性化した 測点番号	
0.75	2.5Hz~3.5Hz	引張	12~14	21~23
1.0	3.5Hz~4.5Hz	引張	12~14	21~23
1.25	4.5Hz~5.0Hz	引張・ せん断	12~14	20~23

表-3 解析モデルに与えた正弦波の周波数

速度の振幅	入力した正弦波の周波数
(m/s)	
0.75	周波数 <i>f</i> =1.0Hz, <i>f</i> =2.5Hz~ <i>f</i> =5.0Hz
	まで0.5Hzごとに7段階
1.00	周波数 <i>f</i> =1.0Hz, <i>f</i> =2.5Hz~f=5.5Hz
	まで0.5Hzごとに8段階
1.25	周波数f=1.0Hz, f=3.5Hz~f=6.5Hz
	まで 0.5 Hz ごとに 8 段階

ン(六面体の要素) 953,700 個で構成されている.数値解 析は、地盤モデルを作成後、掘削領域を一度に取り除く 掘削解析を行った.その後、地下空間のひずみや降伏状 態を確認し、掘削解析後の地質構造モデルに地震波を与 えた.解析は弾性体および Mohr-Coulomb の弾完全塑性 破壊規準に従ったモデルで行った.解析を行う際には、 粘性を持つダッシュポットで接続された自由領域境界を モデル側面に設定して無限領域を再現し、地表面からの 反射を無視できる静的境界を上面に設定した.また、解 析に用いた物性値を表-1 のように与えた.入力地震波 の速度振幅は 0.75 m/s, 1.0 m/s, 1.25 m/s の3 通りとし、 表-3 に示す通り、正弦波の周波数を各段階で設定して 解析を行った.

解析結果より,最も塑性化が進んだ周波数は,速度振幅 0.75 m/s では f=4.5 ~ 5.5 Hz であった (図-4).また,速 度振幅 1.0 m/s, 1.25 m/s では塑性化が最も進んだ周波数が, いずれの場合も f=4.0 ~ 5.0 Hz となった (図-5,図-6).こ れらの周波数が卓越した地震波が作用した場合,採石地





正弦波f=1.0Hz 正弦波f=5.0Hz 図-4 大谷採石地下空間塑性状況 (速度振幅 0.75 m/s)



正弦波f=1.0 Hz



正弦波f=4.5 Hz

図-5 大谷採石地下空間塑性状況 (速度振幅 1.0 m/s)



下空間は崩壊する可能性がある.図-4~図-6より天盤を 切り取り,採石地下空間内の降伏範囲をみると,周波数 f=1.0 Hzの正弦波では,速度振幅0.75 m/s,1.0 m/sのとき, 塑性化する領域はほとんど見られなかったが,これらの 速度振幅において周波数がf=4.5~5.5 Hz,f=4.0~5.0 Hz のとき壁面,天盤周辺で塑性化が進行し,広範囲で降伏 箇所がみられた.しかし,速度振幅1.25 m/sのとき,f= 1.0 Hzにおいて降伏範囲の広がりが確認された.さらに, f=4.5 Hzでは,解析領域の広範囲で引張・せん断により 降伏する様子が確認された.本研究で適用した速度振幅 における天盤ひずみを図-7~図-9に示す.図-7~図-9の 解析結果から読み取った正弦波入力後の天盤の最大ひず



図-7 速度振幅 0.75 m/s における z軸方向の天盤ひずみ



図−8 速度振幅 1.0m/s における z 軸方向の天盤ひずみ



図-9 速度振幅 1.25 m/s における z 軸方向の天盤ひずみ

表-4 ひずみ最大値とそのときの正弦波の周波数

速度の振幅	ひずみが最大に	最大ひずみ(%)
(m/s)	なるときの周波数(Hz)	(天盤)
0.75	5.0 Hz	0.49
1.00	4.5 Hz	1.66
1.25	4.5 Hz	1.34

表-5 過去に実施された試験結果。

速度の振幅	破壊時ひずみ(%)		
(m/s)	三軸圧縮試験	一軸圧縮試験	
0.75			
1.00	0.5~0.9	0.5~0.7	
1.25			

	地震の種類		地震名	観測場所	発生時刻
case1-A	海溝型地震	+ @	東北地方	栃木県 宇都宮市大谷町	2011 年3月11日
case1-a		│ ^坐 辰 │ 太 震 │ │ │	太平洋沖地震	宮城県 栗原市築館	14時46 分
case1-B			福島県沖	栃木県 宇都宮市大谷町	2014年7月12日
case1-b		~ #		福島県会津若松市	₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩₩
case2-C	内陸地震	示辰	茨城県	栃木県 宇都宮市大谷町	2014年9月16日
case2-c			비비 번 마	群馬県桐生市	±∠⊍寸20刀

表-6 使用した地震波データ



図-10 観測点における応答加速度のフーリエス ペクトル(casel-A)

みを表-4 に、過去の破壊時ひずみの試験結果を表-5 に 示す.破壊時ひずみと近似している、またはそれよりも 大きなひずみを大谷地域で観測した場合、天盤や壁面の 剥落や、採石地下空間が地震時に崩壊する危険がある.

3. 固有周期に着目した地震時応答解析

地震動は様々な周波数の振動が合成されたものであり、 卓越した振幅周波数である卓越周波数に注目する.地盤 は振動しやすい固有周波数を持っており、卓越周波数と 固有周波数が一致すると共振現象が起こり、地盤は不安 定となる.検討対象とした地震波は、2011年東北地方太 平洋沖地震の本震、余震の地震波の栃木県宇都宮市大谷 町で観測された地震波¹と K-net で観測された地震波⁷の 計 6 個の地震波データを与えることとし、具体的に case 区分をする(表-6).解析モデル、解析領域は前節と同様 であり、地震波データから主要部分を抽出した加速度デ ータを解析モデル底面に作用させた.

casel-A と casel-a の大谷採石地下空間内上部に設定した観測点における応答加速度のフーリエスペクトルで整理した波形を図-10,図-11に示す. casel-Aについては、



スペクトル(casel-a)



図-12 大谷採石地下空間の塑性領域(casel-a)

入力地震波と概ね似た波形を示した. 応答加速度は入力 地震波のものよりも大きい値を示し,採石地下空間は, この地震波の影響を大きく受ける. casel-B, casel-b の場 合では,採石地下空間の固有周期と地震波の卓越周期が 一致せず共振現象が起こらないと考えられ,応答加速度 は徐々に減少する傾向を示した. この傾向は, case2-C, case2-c についても同様である. しかし, case1-a は入力地 震波のものよりも 10 倍以上大きい応答加速度を示し, 全 case の中で最も大きな影響を大谷採石地下空間に与え ている.この場合の解析モデルを天盤高さで見ると,壁 面や天盤の広範囲で降伏状態に達している箇所が確認さ れた(図-12).casel-a では構造的に採石地下空間が大き く崩壊することはないが,落盤や壁面が崩落する可能性 や,採石地下空間の一部が崩壊する可能性が示された.

4. 危険判定評価項目について

大谷採石地下空間における地震時応答解析の結果をも とに、常時・非常時における大谷採石地下空間の危険判 定項目を作成する. 今回実施した地震時応答解析の結果 をもとに, Seiki et. al.⁴ が提案した常時・非常時の点検項 目を更新する、本研究で実施した地震応答解析からパラ メータを天盤状況、ダテ周辺状況、節理の状態の3項目 として作成した危険判定評価項目を以下に示す. 今回の 解析では、現地調査を行っていないため、非常時点検項 目の評価結果のみ示す. casel-a の解析結果を用いて, 崩 落可能性などを評価した結果, 天盤周辺およびダテ周辺 で、剥落発生、落石有なので70点満点(**表-7)**中40点とな った、この結果から、地震発生後に落盤している箇所が 存在するため早急な対策が必要とされることが予想され る. この危険判定評価項目では、"きず"と呼ばれる節 理分布を考慮していないため、若干安全側の傾向を示す が、解析結果の傾向を反映しているため適当であると判 断する.

5. まとめと今後の課題

(1) 地震応答解析

本研究では、現在まで大谷採石地下空間の固有周期は 明らかにはなっていない³ので、大谷採石地下空間を再 現した解析モデルの底面に正弦波を与え、速度振幅 0.75 m/sでは*f*=4.5~5.5 Hz、速度振幅 1.0 m/s、1.25 m/sでは*f*= 4.0~5.0 Hz において塑性化が最も進行し、降伏箇所が広 がることを明らかにした.また、天盤と壁面のひずみは、 表-3 のようにそれぞれ大谷石の岩体が塑性化するひず みを超える値を示し、解析モデルが崩壊に至ることが予 想される.したがって、これらの結果から、大谷採石地 下空間の固有周期は、これらの周波数付近であると推定 した.今後は、より現実的な安全性の検討を行うため、 実際に本研究で再現した大谷採石地下空間で観測した地 震波を用いて大谷採石地下空間の安全性を検討する.

今回の解析では、実際に大谷地域で観測された地震波 と震源近くで観測された地震波とで比較、検討を行った. 本研究で適用したのは、近年で最大級の地震である2011

表-7 危険判定評価項目と採点結果

A. 早急な対策を必要とする項目

点検個所	分類パラメータ	区分
天盤周辺	落盤	有り
ダテ周辺状況	新しい節理の発生	有り
節理状況	新しい節理の発生	有り

B. 常時·非常時点検項目

点検個所	分類パラメータ	評点区分	配点	評点
	剥落箇所	無	0	
天盤状況		有	8	/8
	落石	無	0	
		発生	7	[7]
	剥落箇所	無	0	
ダテ周辺状況		有	13	/13
	落石	無	0	
		発生	12	/12
	間隙	無	0	
		開口(1m以上)	10	
節理状況		開口 (1m 以下)	5	/15
	表面の状態	変化なし	0	
		粗い	10	
		やや粗い	5	/15
				/70点

年東北地方太平洋沖地震の地震動を用いたが,さらに大 谷採石地下空間の特性・挙動を明らかにしていくために, 様々な地震動に対して大谷地域で観測された地震波と震 源近くで観測された地震波とで検討を進めていく必要が ある.また,今回実施した地震応答解析は,節理を考慮 していないため,実際に地震が発生した時よりも危険側 の解析となった.今後は,再現した解析モデルに節理を 反映させ,より現実的な地震応答解析を実施するべきで ある.その上で,より詳細な安全性評価項目を作成する 必要がある.

(2) 危険判定評価項目

本研究は、危険判定士の方々に対して、ヒアリング調 査を実施することができなかったため、深く研究するこ とができなかった.長年の経験や知識から感覚的に判断 している危険判定士の方々から危険判定の基準や視点な どを多数ヒアリング調査することにより、評価項目の節 理状況を具体的に数値化していく必要がある.また、ヒ アリング調査を実施するたびに妥当性の判断を行い、危 険判定評価項目の作成を進めるべきである.

参考文献

- 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) 高葉 悠,島田大輔,大坪孝太郎,清木隆文: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,地下空 間シンポジウム論文・報告集,第18巻,土木学会 [一般投稿 論文],pp.41-46.2013.

- 4) Seiki, T., Takaba, H. and Hasegawa, N. : Some Considerations on Seismic Stability of Oya Underground Quarry, Proc. of 2014 ISRM Intl. Symp. 8th Asian Rock Mechanics Symposium Rock Mechanics for Global Issues – Natural Disasters, Environment and Energy -, ERD4-4, Sapporo, Japan, 9ps, 2014.
- 5) 小島 芳之,野城 一栄:既設鉄道山岳トンネルの地震対策 と震災復旧の考え方,トンネルと地下,Vol.43, No.12,

pp.959-966, 2012.12.

- 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,pp.12-37.1973.
- 7) 防災科学研究所強震観測網 (K-NET, KiK-net): http:// www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/, 2015年9月確認.

CONSIDERATION TO SEISMIC SAFETY EVALUATION OF OYA UNDERGROUND QUARRY

Tomoaki ISHII, Takafumi SEIKI and Kaisei TADA

Oya tuff ,which is one of the famous building stone and is classified into pumice volcanic tuff, has been extracted from underground quarries around Oya town, Utsunomiya City, Tochigi Prefecture, Japan. Up to now over 200 underground quarries are developed and abandoned. The authors have been involved with the evaluation of the stabilities un-supported underground spaces for public utilization. This paper presents the outcomes of dynamic analyses on the stability condition of some underground quarries during quarrying and seismic loading with field measurement and numerical analyses. And the authors revised safety evaluation sheet.