

漸増動的解析方法による大谷採石地下空間の耐震性能評価に関する検討

宇都宮大学大学院 学生会員 ○程 伝涛
 宇都宮大学 学生会員 加藤 俊紀
 宇都宮大学大学院 正会員 清木 隆文

1. はじめに

地震のほとんどは、プレートの境界付近で帯状に発生している¹⁾。茨城県県沖のプレートに注目すると、今後30年以内の発生確率は90%程度以上と報告されている²⁾。大きな地震が発生する可能性があることを示している。この巨大地震が発生する時、宇都宮市も大きな影響を受ける可能性がある。宇都宮市大谷町地域では、200箇所以上の大谷石が地下採石場から採石され、大規模な地下空洞が形成されている。有効利用の観点から、地震動の構造安定性への影響を検討する必要がある。

本研究は、大谷地域で観測された地震記録4件(後述)をもとにして、漸増動的解析方法 (Incremental Dynamic Analysis, 以下 IDA)²⁾ を導入して、大谷採石地下空間の耐震性能を確認することを試みた。この結果を利用して、大谷採石地下空間で動的安定性の評価基準の確立を試みる。この基準で、大谷採石地下空間の地震時の構造安定性向上のための知見を得ることを目的とする。

2. 解析モデル

本研究では、現地測量の資料に基づいて、500 m×500 m×100 m の領域における大谷採石地下空間の解析モデル(図-1)を Flac3D で作成し、モール・クーロン破壊基準に基づく完全弾塑性動的解析を行った。解析に用いた各種定数を表-1 に示す。また、モデルの側面における反射波の影響を取り除くために無限境界条件を設定した。三角級数重ね合わせ手法 (Trigonometric series superposition method, 以下 TSSM)³⁾ で合成した地震波から極端な長周期を除いたものを、入力地震動として、解析モデルの底部に入力した。

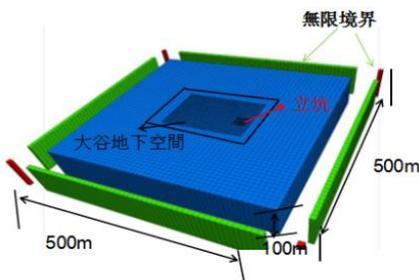


図-1 大谷採石地下空間の3次元モデル

表-1 解析モデルのパラメータ⁴⁾

体積弾性係数	せん断係数	粘着力	内部摩擦角	引張強度	密度
GPa	GPa	MPa	°	MPa	kg/m ³
1.38	0.91	2.1	30	1.08	1730

3 漸増動的解析方法 (IDA)による耐震性能評価

3.1 IDAの概要

この手法は、地震入力波の強度を漸増させた非線形時刻歴応答を求めることで得られる IDA 曲線に基づいて構造物の性能を評価するものである。予め決定した地震動レベルと性能レベルに応じて、大規模な地下空間に対する安定性評価基準が得られる。耐震性能レベルを分類するために、構造物の設計の基本⁵⁾レベル2地震動を採用している。ISO23469 構造物の設計の命名スキームに従って、運転基準地震 (operating basis earthquake, 以下 OBE) レベルと安全性検証地震 (safety evaluation earthquake, 以下 SEE) レベルを設定する。

3.2 現場計測に基づいた入力地震の選択

本研究では、大谷採石空間底部で計測された地震動記録を活かして、茨城県近海のプレート境界を震源とする地震動記録(表-2)の地震波のピーク加速度 (PGA) に基づいて10段階の周波数変化を伴う振幅変調を行う。ここでは、振幅変調の上限は地下空間が完全に不安定になる条件を設定することを考えた。

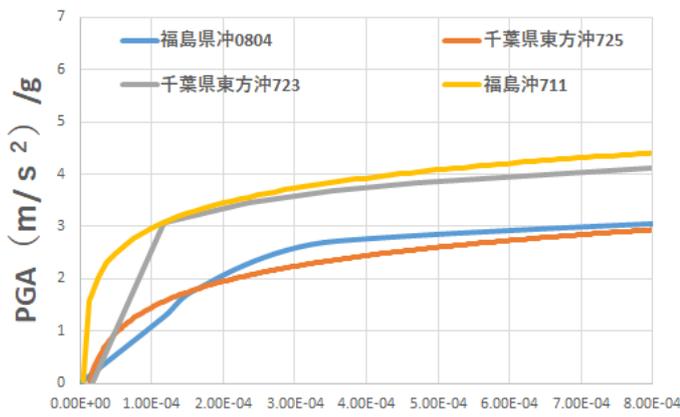
3.3 IDA分位分析

D. Vamvatsikos らの研究⁶⁾によると、弾性傾斜率が0.2倍弾性傾斜率Keの点を安全性保証点とすることが提案されている。この観点に従ってケーススタディを行うと、工学的基盤面のPGAが1.54g (gは重力加速度, g=9.81 m/s²) に達すると加速度が15.1m/s², 対応する塑性領域が1.5×10⁵m³であることが安全保証点となり、この時点で地下空間が不安定になり始める。しかしながら、直ちに崩壊することがない。そのために、この安全性保証点後、支保工を設置する必要がある。本研究で

は塑性開始点が機能保障点として定義した。このために、図-2 に示す 75%の分位 (Quartile) を示す IDA 曲線から大谷地下空間内部が震度 6 弱を超える PGA として、0.275g の加速度 2.698 m/s² に対応する塑性領域が 450 m³ として得られる。この時点では、対象とした大谷採石地下空間は、採石作業などための機能に大きな影響を与えないとし、安全性の点検と修復工事を施す必要があると判断される。

表-2 分析対象とした地震の諸元リスト

	Dep.(km).	Mag	Region
1	33	1.9	福島県沖
2	45	6.4	福島県沖
3	49	3.6	福島県沖
4	51	3.6	千葉県南東沖



最大層間変位角θmax

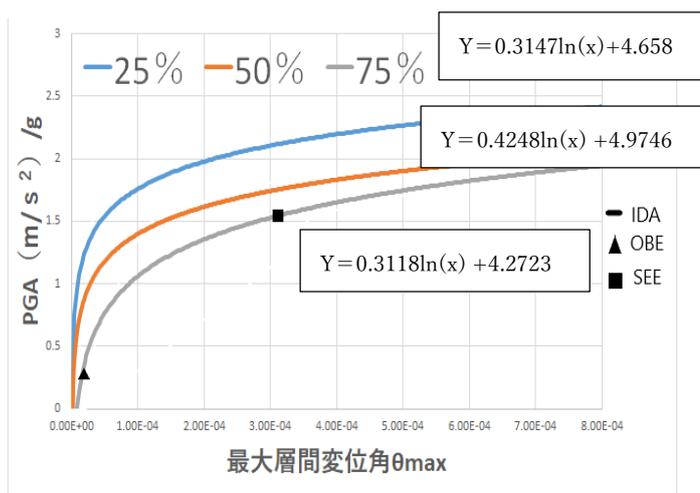


図-2 IDA 分位曲線

IDA 法を利用して、破壊の程度の違いが安定性に与える影響を明確に評価することができた。特に 75%分位の IDA 曲線から、1 例で与えた地震動が OBE (機能

表-3 解析結果に基づいた耐震ランク判定の目安

耐震	震度	ピーク加速度	層間最大変位角	塑性状況	緊急時対応マニュアル
AA	0-6 弱	0~2.698m/s ²	0~0.25×10 ⁻⁵	塑性領域がなし	損傷がない、余分な応答が要らない。
A	6 弱-7	2.698m/s ² ~15.1m/s ²	0.25×10 ⁻⁵ ~0.0003	塑性化中	地下空間構造物が機能に悪影響を与えない程度の軽微なあるいは補修可能な損傷を受けており、支保工を考慮することで機能の改善が得られる。点検と修復工事の必要がある。
B	7 以上	15.1m/s ² ~	0.0003~	1.5 × 10 ⁵ m ³	機能の悪影響を与える。この時点で地下空間が不安定になり始めるが、直ちに崩壊することがない。埋め戻しまたは支保工の必要がある。

障点) と SEE (安全保証点) の応答与える事を示した。

4. まとめ

IDA 方法を利用して、IDA 分位曲線を得た。この曲線は、解析モデルにより再現した大谷採石地下空間が安全状態から完全に崩落するまでの全過程を詳細に示した。特に、75%分位の IDA 曲線から本研究で扱った地震動が OBE (機能保障点) と SEE (安全保証点) の応答を与えることを示している。その結果、将来発生する可能性がある震度 6 弱の巨大地震は、大谷石の採石業務などに大きな影響を与えないこと、地下空間構造物が軽微または補修可能な損傷の範囲に収まることがケーススタディを通して明らかになった。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：地震発生確率と震度予測マップ (「レシピ」), [2018 年-2020 年].
- 2) Vamvatsikos D and Cornell C A. Incremental dynamic analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, 31(3) : 491- 514.
- 3) Housner GW . Characteristic of Strong Motion Earthquakes [J]. *Bull Seismol Soc Amer*, 1947, 37 (1):19 ~31
- 4) 清水建設株式会社：丸彦製菓地下工場構造安定性に関する検討書, 1989.7.
- 5) International Organization of Standardization. ISO23469-2005 Bases for design of structures-seismic actions for designing geotechnical works[S]. Geneva : International Organization of Standardization, 2005.
- 6) Vamvatsikos D . *Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis* [Ph. D. Thesis] [D]. California : Stanford University, 2002.