大谷採石地下空間の地震時の挙動に着目した安全性の検討

宇都宮大学	学生会員	○長谷川	直美
宇都宮大学大学院	学生会員	島田	大輔
西松建設株式会社		高葉	悠
宇都宮大学大学院	正会員	清木	隆文

1. はじめに

宇都宮市には、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 活性化につながることが期待でき、様々な施設利用が 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, 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.しかし、事故後の調査や既往の研究によ り、陥没した主な原因は安全性を軽視した採掘方法に あるという事実が示され,結果として陥没する可能性 が高い空間が陥没したということがわかった. 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,現地調査及び有限差分法 による解析ソフト FLAC3D を用いて、対象とする栃木 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.空間にとって最も危険となる 挙動を示す地震波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.

2. 大谷採石地下空間の地震時応答解析

2.1 大谷採石地下空間上部の土被りについて

大谷採石地下空間上部 30m の地盤は,関東ローム層 と大谷石岩盤が存在している.解析をする上での計算 時間を短縮することを目的とし,この範囲の地盤を等 分布荷重と設定し簡易的に取り扱う数値解析の妥当性 の確認を行った.

数値解析の対象とした簡略モデルの形状を図-1に示 す.地表面から15mに関東ローム,15~30mに大谷石 岩盤の物性値を設定し計算した60m×60m×98mの領 域を持つゾーン(要素)352,800個で構成されているモ デルと,地表面から30m分の地盤を等分布荷重として 計算した60m×60m×68mの領域を持つゾーン244,800 個で構成されるモデルの底面に地震加速度を入力し, 結果を比較した.なお,ゾーン1つの大きさは1m×1m ×1mとした.また,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た(表-1)².

大谷石	関東ローム			
1.38	1.66			
910	17			
2.1	1.5×10^{-2}			
30	40			
1.1	1.6×10^{-2}			
1770	1350			
	大谷石 1.38 910 2.1 30 1.1 1770			

表-1 物性值一覧²⁾



数値解析の結果,ひずみの広がり方に大きな差はなく, 塑性化に伴う降伏箇所も見られなかった。等分布荷重 で設定した解析の方は,再現していない地盤の剛性を 考慮しないことになるので,壁面と底面の隅角部にお いてひずみの値(圧縮)が大きくなり,若干安全側の 解析となっていたと考えられる。しかし,天盤または 壁面のひずみ最大値の差はそれぞれ 0.021%と 0.0056% と小さく,大谷石破壊時のひずみ(0.5~0.9%³⁾)と比較し ても非常に小さな値となったので,この範囲の地盤を 等分布荷重として設定し解析を行うことに問題はない と考えられる。したがって,以後の解析では大谷採石 地下空間の上部 30m の地盤は,等分布荷重として解析 を行うこととする.



2.2 固有周期に着目した地震時応答解析

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い,地下空間の変位や降伏状態 を確認した.その後,掘削解析後の地質構造モデルに 地震波を与え,降伏状態を確認した.解析は Mohr-Coulombの弾完全塑性破壊規準に従って実施した. 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.解析モデルは340m×330m×68mの 領域を持ち,2m×2m×2mのゾーン(要素)953,700 個で 構成されている(図-3).

キーワード 大谷石,地下空間,地震時,安全性

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学陽東キャンパス 10 号館 6 階岩盤工学研究室 E-mail:t102834@cc.utsunomiya-u.ac.jp Tel:028-689-6218

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⁴⁾,また,一般に高 周波であるほど動的解析と静的解析の結果に差異が生 じることから,入力地震波の正弦波f = 1.0Hzを基本と し,f = 2.5Hz~5.0Hzまで0.5Hzごとに設定し,周波数 を7段階で設定して解析を行った.なお,地震外力を 加速度として与えるため,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において観測され た加速度データ⁵⁾から主要動部分を抽出して,解析モデ ル底面に作用させた.



図-3 解析領域の設定と再現した大谷採石地下空間

解析の結果より、この解析モデルの塑性化が最も進んだ正弦波の周波数は $f=3.5\sim5.0$ Hz であった.天盤を切り取り採石地下空間内部の降伏範囲を確認すると、基本となるf=1.0Hz の正弦波ではほとんど塑性化が見られないが、 $f=3.5\sim5.0$ Hz では壁面、天盤周辺で塑性化が進行し、広い範囲で降伏箇所がみられた(図-4).また、正弦波入力後のひずみはf=4.0Hz において最大で、天盤のひずみは 0.24%、壁面のひずみは 0.34%となった(図-5).これは大谷石破壊時のひずみ(0.5~0.9%) ³⁾に近い値を示しており、この周波数が卓越した地震波が大谷地域で発生した場合、天盤や壁面の剥落や、採石地下空間が崩壊する危険性が示された.



3. まとめと今後の課題

3.1 大谷採石地下空間上部の土被りについて

大谷採石地下空間上部 30m の地盤を等分布荷重で設 定した場合と,地表面から 15m に関東ローム,15~30m に大谷石岩盤の物性値を設定し計算した場合とでは, 天盤・壁面のひずみの広がり方に大きな差はなく,最 大値の差も僅かであった.

この値は、大谷石破壊時のひずみと比較しても、非 常に小さいので、計算時間短縮のために地表面から採 石地下空間までの地盤を等分布荷重で設定しても問題 ないということが示された.



図-5 z軸方向の天盤ひずみ(伸びひずみが正)

3.2 固有周期に着目した地震時応答解析

一般の構造物はそれぞれ最も振動しやすい周期,固 有周期を持っている.この固有周期と合致した地震動 が発生した場合,従来の地震とは異なる挙動を示す恐 れがある.しかし,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^の.

大谷採石地下空間を再現した解析モデルの底面に正 弦波を与えたところ,周波数f=3.5~5.0Hzにおいて塑 性化が最も進行し、降伏箇所がかなり広がっていた. 天盤と壁面のひずみに関しては、それぞれ大谷石が破 壊するひずみに近い値 0.24%, 0.34%を示した. これら の結果から、大谷石の固有周期は周波数f=3.5~5.0Hz 付近であると推定した. 今後, 大谷採石地下空間の固 有周期に着目した地震時応答解析をするためには、フ ーリエスペクトル解析を用いて、周波数f=3.5~5.0Hz が卓越した地震波を選定し、同じ加速度を持つ地震動 で,固有周期が卓越した地震波とそうでない地震波を 入力したときの結果を比較し、 地震時の挙動にどのよ うな差が出るのかを確認し検討する.しかし、今回の 解析で用いた加速度は、レベル2地震動を想定した大 規模の地震動であったため、今後の解析では、比較的 頻繁に発生するレベル1地震動等,様々な規模の加速 度に関しても検討する必要がある.

参考文献

- 井上 達也, 佐藤 大地, 清木 隆文:環境負荷と利用者の 意向に着目した大谷採石地下空間の有用性評価に関する 検討, 土木学会第40回関東支部技術研究発表会講演概要 集, CD-ROM, IV-24, 2013.
- 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) 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.
- 4) 池永 幸司,保田 尚俊,嶋本 敬介,朝倉 俊弘,小林 俊 彦:動的解析による山岳トンネルの耐震評価における静 的解析妥当性の検討,トンネル工学報告集,第22巻,土 木学会,トンネル工学委員会,pp261-267,2012.
- 防災科学研究所強震観測網(K-NET,KiK-net): http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/, (2014.1 確認).
- 6) 高葉 悠,高橋 真太郎,奈良部 明鼓,清木 隆文:大谷 採石地下空間の第三者から見た構造安定性に関する研究, 土木学会第 40 回関東支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM,Ⅲ-41, 2013.