

氏 名	とみ た あつ のり 富 田 敦 紀
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論工博第 3976 号
学位授与の日付	平成 20 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	堆積軟岩空洞の掘削損傷領域評価に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 岡 二三生 教授 石田 毅 教授 木村 亮

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、廃棄物の処分施設などのため地下深部の堆積軟岩地盤に地下空洞を構築する際の空洞掘削に関する研究である。試験空洞の掘削時における空洞壁面の剥落や亀裂の発生を観察し、そのメカニズムが掘削に伴う応力変化、応力集中による割裂破壊の進行による Spalling 破壊であることを明らかにするとともに、地圧、変形および間隙水圧の計測と間隙水圧を考慮した水-土連成数値シミュレーションによる掘削に伴う損傷領域の評価についての研究の成果をまとめたものであり、序論、結論を含め 8 章から成る。

第 1 章は序論であって、本研究の背景となる地下空洞構築に関する諸問題、および従来の研究成果について述べるとともに、本研究の目的および各章の概要を示している。

第 2 章では、試験空洞掘削に当たり実施した地質調査結果、試験空洞の設計内容について述べるとともに、情報化設計施工としての計測管理の考え方、計測内容及び計測データをもとに行った解析モデルの改良点について示した。

掘削時解放率は、掘削時の岩盤変位計測結果から評価した先行変位率を地圧の掘削時解放率と定義し、掘削ベンチごとの切羽距離と変位発生率の関係を三次元 FEM 弾性解析による変位発生率と比較した結果、掘削時解放率はアーチ部で 50%、側壁部で 70% であった。岩盤の弾性係数は、初期地圧を固定した順解析 (弾性解析) により計測値と解析値の誤差が最小となるように同定する直接定式化法により等価弾性係数を算定した結果、2000MPa 程度であり、この等価弾性係数は、室内試験結果の約 2～3 倍程度であるが、原位置試験 (孔内载荷試験) の除荷時割線弾性係数と同程度であった。

第 3 章では、作業性およびコストメリットの高い円錐孔底ひずみ法を間隙が水で飽和した堆積軟岩および下向きボアホールなど、孔内が水没する場合の円錐孔底ひずみ法の適用性について述べ、事前試験として、二軸载荷試験による接着剤の接着性能および測定感度の確認、フラットジャッキ式三軸試験機による接着剤配合の違いによる感度変化および応力評価を実施し、原位置での測定手順を提案した。原位置において、円錐孔底ひずみ法および埋設ひずみ法による測定を実施し、その適用性を明らかにした。接着剤の選定試験結果では、接着性能が低いシアノアクリレート系接着剤に比べ、エポキシ系接着剤の接着性能は高いが、エポキシ系接着剤は貼り付け時に厚みがあり、ストレインセルが直接岩盤面に接着していないため、エポキシ樹脂の剛性により測定感度に低下が生じる。このため、エポキシ系接着剤を用いる場合には、オーバーコアリングで回収したコアに対して原位置三軸感度試験によりひずみ感度係数を求める必要があること、室内試験でのオーバーコアリングは、 $\phi 110\text{mm}$  で実施した結果、薄肉部において亀裂が発生したことから、原位置でのオーバーコアリングは  $\phi 200\text{mm}$  以上必要であることを示した。

第 4 章では、試験空洞の掘削時における空洞壁面の剥落や亀裂の発生を観察し、そのメカニズムが掘削に伴う応力変化、応力集中による割裂破壊の進行による Spalling 破壊であることを明らかにするとともに、掘削時の Spalling の特徴はアーチ天端で発生した剥落は薄い楕円状であることと壁面近傍での亀裂が壁面に低角度であることを明らかにし、低拘束圧では Spalling 破壊が発生することを解明している。さらに、実岩盤での空洞掘削後の岩盤内応力測定結果に基づき、要素試験で

設定した破壊規準およびオーバーコアリング時に確認されたコアディスク現象をも考慮し、破壊現象の明らかにした。

第5章では、試験空洞インバート部を対象に空洞掘削前後の変形特性の変化および影響領域を明らかにするとともに、掘削後の岩盤応力測定結果に基づき変形特性の拘束圧変化を示した。掘削による変形特性の変化から推定される影響領域は、底盤深度3.0m程度であり、岩盤内応力測定結果から評価した塑性化領域と一致する。健岩域での変形特性の変化は、全ての変形特性に拘束圧依存性が認められ、健岩域での弾性係数の低下は掘削による拘束圧低下に起因するものである。

第6章では、空洞掘削時に確認された軟岩特有の特徴的な間隙水圧挙動について、その挙動要因を掘削解放に伴う間隙水と変形一応力の連成した挙動であるとし、そのメカニズムの妥当性を検証するために、三次元弾性水-土連成有限要素解析を行った。間隙水圧挙動から、空洞壁面近傍は非排水と排水の遷移状態にあると言えるが、空洞壁面近傍の有効応力の変化量に比べて、間隙水圧の変化量は小さい。このため間隙水圧挙動が本試験空洞周辺の力学的安定性に与える影響は結果的に少ない。ただし、軟岩の剛性がより小さい場合、不均質な場合、あるいはより大深度での掘削などでは、空洞掘削に伴い空洞周辺の間隙水圧が一時的に増加するとともに、有効応力が減少することで壁面近傍の岩盤が破壊状態に近づき、新規亀裂の発生や透水性の増加といった掘削影響領域の発生・拡大することが予測される場合は、有効応力で定式化された水-土連成解析法で空洞の力学的安定性を検討する必要がある。

第7章では、足立・岡によって提案されているひずみ軟化型弾粘塑性モデルに強度、変形特性の拘束圧依存性およびひずみ速度依存性を考慮し、ひずみ軟化型弾粘塑性水-土連成解析を実施し、その適用性について室内試験結果および掘削時挙動と比較して検証するとともに接続処分空洞の安定性評価方法を提案した。ひずみ軟化型弾粘塑性水-土連成モデルに拘束圧依存性およびひずみ速度依存性を考慮することにより、拘束圧および載荷速度がそれぞれ異なる試験結果を精度よく再現できることを確認した。本モデルを掘削問題へ適用した結果、掘削過程の岩盤内変位の解析結果は、計測に比べて若干大きめの傾向であるが、間隙水圧挙動および支保工応力などの計測値と解析値はよく一致しており、空洞挙動の再現性が高いことを示した。有効応力解析における初期地圧の設定方法に関する問題点を明らかにし、調査坑、アプローチトンネルなどの間隙水圧の影響を考慮した初期地圧推定方法を提案した。ただし、掘削による間隙水圧の変化は本来三次元的であり、調査坑掘削前地圧にも種々の不確実性が内在することから、常に慎重に初期地圧を設定する必要がある。最後に、接続処分空洞の安定性予測評価方法に関する提案も行った。

第8章は結論として、本研究によって得られた結果をまとめるとともに、今後の課題について述べている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、廃棄物の処分施設などの利用を目的として地下深部の堆積軟岩地盤中に構築する地下空洞の設計・施工に関し、空洞掘削での地圧、変形および間隙水圧の計測と間隙水圧を考慮した水-土連成の数値シミュレーションによる掘削に伴う損傷領域の評価の研究の成果をまとめたものであり、得られた成果は以下のとおりである。

1. 堆積軟岩内に試験空洞を設計、掘削し、掘削時の地圧、変形、間隙水圧の変化を測定している。3次元地圧測定に当たっては、測定手順、接着剤やオーバーコアリング径を改良するとともに、円錐孔底ひずみ法を採用し、間隙水で飽和された軟岩での3次元応力測定を精度よく行うことに成功している。

2. 試験空洞の掘削時における空洞壁面の剥落や亀裂の発生を観察し、そのメカニズムが掘削に伴う応力変化、応力集中による進行性の割裂破壊によるSpalling（剥離）現象であることを明らかにするとともに、掘削時のSpallingの特徴はアーチ天端で発生した剥落は薄い楕円状であることと壁面近傍での亀裂が壁面に対して低角度であることを明らかにしている。さらに応力径路法を用いて要素試験を実施し、低拘束圧ではSpallingが発生することを解明している。

3. 堆積軟岩中の空洞変形特性の拘束圧依存性を把握するため、空洞周辺で応力を測定した結果インバート深部で応力集中が大きいことを明らかにするとともに、水-地盤連成挙動の解析に必要な空洞周辺での間隙水圧の測定を行い、水圧の変動は少ないが掘削と間隙水圧の連成挙動を明らかにした。

4. 間隙水と地山の変形の相互作用を明らかにするため、3軸試験を実施し、そのデータに基づいて軟岩のひずみ軟化型構成式を用いた水-土連成のひずみ軟化型の弾塑性有限要素法による掘削解析を行い、経時的な空洞壁面変位の発生傾向や岩盤内の変位の深度分布を予測することに成功している。

5. 最後に、本研究に基づき、計画時と建設時の2つの段階でとるべき連接廃棄物処分空洞の安定性の予測評価手法を考察し、建設時・使用時安定性評価には水-土連成の解析を用いるべきであることを提案している。

以上、要するに本論文は、堆積軟岩で空洞の掘削にともなう損傷評価の方法について、実測結果と間隙水を考慮した予測解析手法について新たな知見を与えたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年12月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。