

ひずみ軟化挙動を考慮した堆積軟岩中の立坑逐次掘削解析

大成建設(株)技術センター 正会員 ○小川 豊和, 青木 智幸
 原子力本部 正会員 木ノ村 幸士
 (独)日本原子力機構幌延深地層研究センター 正会員 松井 裕哉

1. 目的

幌延深地層研究計画では、深度 500m に達する地下研究施設を現在建設中であり、この施設を利用して高レベル放射性廃棄物処分に関する研究を実施する計画である。地下研究施設周辺の堆積軟岩は拘束圧下でひずみ軟化挙動¹⁾を示すため、地下施設の力学安定性の評価を行う場合、その特性を踏まえた検討が重要であると考えられる。本研究の目的は、ひずみ軟化挙動を考慮した空洞安定性評価手法を提案し、その適用性を確認して地下施設建設に伴う掘削影響の範囲やその物性の予測を行うことである。ここでは、その一環として実施した、施工手順を考慮した立坑の三次元逐次掘削解析（以後、立坑解析）の結果を報告する。

2. 非排水三軸圧縮試験結果を利用した解析物性値の設定

本プロジェクトで実施した地表からのボーリングで採取した岩石コアの圧密非排水三軸圧縮試験結果と、ひずみ軟化挙動を考慮したシミュレーション結果を比較することにより、以後の立坑解析に用いる岩盤物性値を決定した。図 1 は深度 280m 付近で採取された珪質泥岩コアについて行った両者の比較結果である。同図より決定した珪質泥岩の物性値を表 1 に示す。なお、本研究の解析は、いずれも有限差分法解析コード FLAC3D²⁾を用いて実施した。

3. 解析モデル

立坑解析に用いた解析メッシュを図 2 に示す。解析領域は、立坑直径 5.0m に対し直径 100m、高さ 100m の円筒形で、ひずみ軟化の非対称性を考慮し全断面モデルを採用した。掘削サイクルは、図 3 に示す実施設計³⁾の施工手順に従い、Z 軸負方向に 1m ずつ掘削を行い、鋼製支保工を 1m ごと、覆工コンクリートを 2m ごとに設置するというモデル化を行った。本解析では、掘削区間を上部境界から 60m とし、検討対象深度が掘削区間の中間深度と一致するよう各要素に初期応力を付与して安定計算を行った後、逐次掘削を開始した。主応力方向は最大主応力 (σ_H) 方向を Y 方向、最小主応力 (σ_h) 方向を X 方向とし、主応力比は初期応力測定結果より

$\sigma_z : \sigma_H : \sigma_h = 1.0 : 1.3 : 0.9$ と設定した。また、境界条件は、上下面境界を鉛直変位固定、円筒外周面境界を側方変位固定とした。

表 1 解析に用いた岩盤物性値の例

パラメータ	単位	値
岩種	---	珪質泥岩
粘着力 (ピーク)	MPa	3.56
摩擦角 (ピーク)	度	27.5
粘着力 (残留)	MPa	0.68
摩擦角 (残留)	度	31.2
ダイレータシール角	度	3.0
単位体積重量	kN/m ³	18.5
鉛直初期応力	MPa	7.3
最大水平応力	MPa	9.4
最小水平応力	MPa	6.5
ヤング率	GPa	1.25
ポアソン比	---	0.26

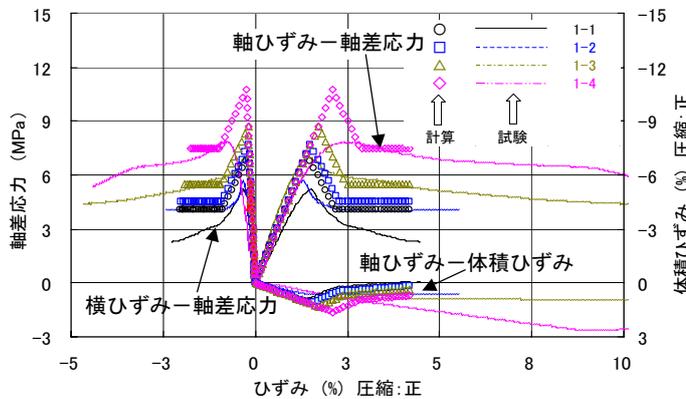


図 1 非排水三軸試験のシミュレーション解析

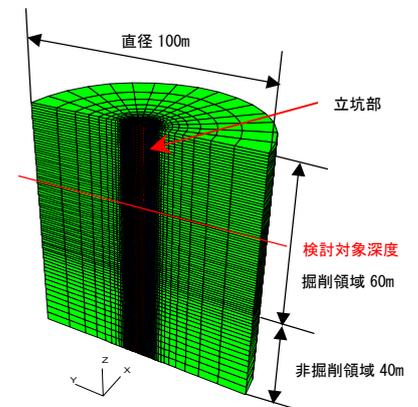


図 2 解析メッシュ (半割図)

キーワード 堆積軟岩, ひずみ軟化, 換気立坑, 逐次解析, 施工手順

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株)技術センター TEL 045-814-7237

4. 解析結果例

本研究では、6つの検討対象深度について立坑解析を実施したが、ここではひずみ軟化が最も顕著に見られた対象深度 355m の解析ケースについて結果の事例を示す。

(1) 周辺岩盤に及ぼす影響

ひずみ軟化の発生を示す例として、切羽進行に伴い周辺岩盤に生じた σ_h 方向地点の周方向応力の変化を図 4 に示す。また、同図には切羽が対象深度を $2D$ ($=10m$: D は立坑直径) 通過した時点の塑性領域図を併記している。なお、発生応力は圧縮を正としている。

同図に示すように、周辺岩盤の周方向応力は切羽通過後大きく変化し、坑壁近傍ではひずみ軟化を生じて残留応力に達している状況を確認できる。また塑性領域図でも、ひずみ軟化の発生に伴って σ_h 方向に塑性領域が拡大する傾向が見られ、坑壁から最大 2.4m の領域が塑性化している。

(2) 支保部材に及ぼす影響

同様に、切羽が $2D$ 通過した時点での鋼製支保工の縁応力の分布図を図 5 に示す。図 3 に示すように、端部の「(e) 鋼製支保工」は「(f) 覆工コンクリート」とともに次の盤下げ時の解放力を分担して負担するのに対し、覆工中央部に位置する「(c) 鋼製支保工」は「(d) 盤下げ」の掘削解放力を単独で負担する。したがって、図 5 に示すように中央部の鋼製支保工の縁応力は端部に比べて大きくなり、ひずみ軟化が顕著に見られた深度 355m の例では中央部の鋼製支保工が普通規格 SS400 の降伏耐力 245MPa を越える結果となった。このように実際の施工手順を考慮した三次元逐次掘削解析を実施することにより、施工手順、施工法の妥当性検討や切羽進行に伴う支保工の健全性評価が可能となり、従来の二次元解析ではわからなかった新たな設計施工上の問題点が明らかとなった。

5. まとめ

ひずみ軟化型弾塑性モデルを用いた立坑の三次元逐次掘削解析を実施した。結果を総合すると、設計段階で設定された工法や支保の仕様は全深度について概ね妥当であることが確認されたが、深度に対して岩盤の強度が小さい深度(355m)では力学的安定性が問題となる可能性があることが明らかになった。また、実際の施工手順に関連して、各支保工の応力状態が不均一になることが分かった。今後、深度 500m までの立坑全体をモデル化し、物性の深度依存性を考慮した大規模な立坑掘削シミュレーション解析を実施する予定である。

参考文献

- 1) 足立紀尚, 岡二三生, 小池真史, 尾崎仁美, 福井英大: 軟岩の時間依存性挙動とひずみ軟化型弾-粘塑性構成式, 地盤工学研究発表会講演集, Vol.32, No.2-1, pp.1187-1188, 1997.
- 2) Itasca Consulting Group: *Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.00*, 2006.
- 3) サイクル機構: 幌延深地層研究計画 地下施設実施設計 設計報告書, JNC TJ5410 2005-002, 2005

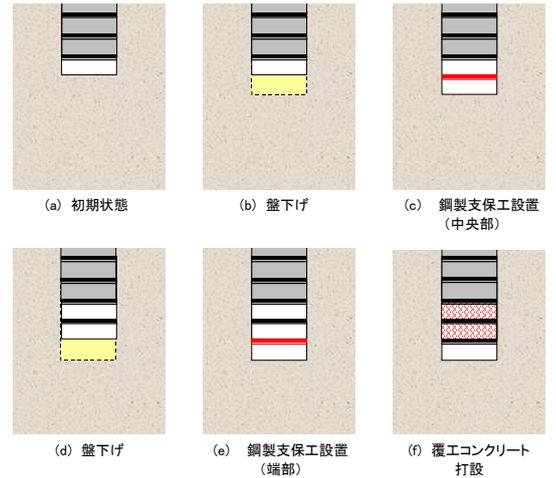


図3 立坑の掘削サイクル

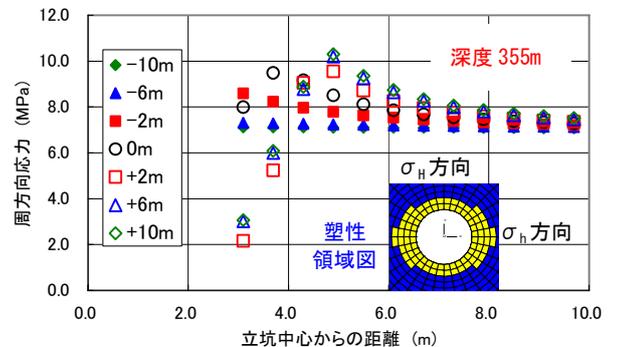


図4 切羽離れとの周方向応力の関係

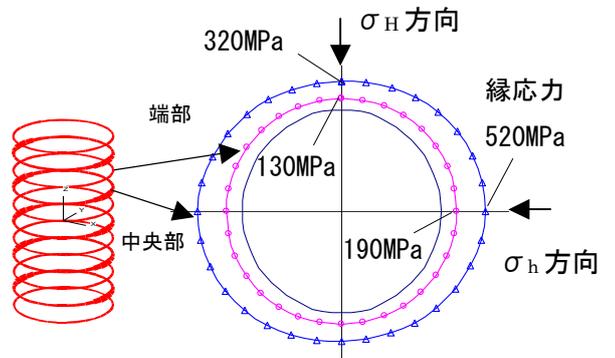


図5 鋼製支保工の縁応力分布図(内側)