

三次元解析による立坑掘削時の覆工および周辺岩盤の挙動分析

坂井 一雄^{1*}・小池 真史¹・青木 智幸¹・山本 卓也²・稲垣 大介³・山崎 雅直⁴

¹大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²大成建設株式会社 土木営業本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

³日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター(〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2)

⁴東京電力株式会社 栃木北支社鬼怒川制御所土木保守グループ(〒321-2526 栃木県日光市鬼怒川温泉滝260)

*E-mail: skikzo01@pub.taisei.co.jp

幌延深地層研究センターでは、地下研究施設の換気立坑と東立坑をショートステップ工法により施工中である。本工法は、掘削後直ちに覆工コンクリートを打設する点で、一般的なNATMによるトンネル掘削とは異なる。そのため、立坑にて計測された覆工および立坑周辺岩盤の挙動は、本工法に特徴的なものとなっている。そこで、本研究ではショートステップ工法による立坑掘削時の覆工および立坑周辺岩盤の挙動を理解し、将来の合理的な設計に資するために、初期地圧の異方性や覆工コンクリートの力学特性の材料変化などを考慮した三次元逐次掘削解析を実施した。その結果、計測結果を定性的に再現することができ、覆工応力の分布は断面内および深度方向に複雑に変化する可能性があることが分かった。

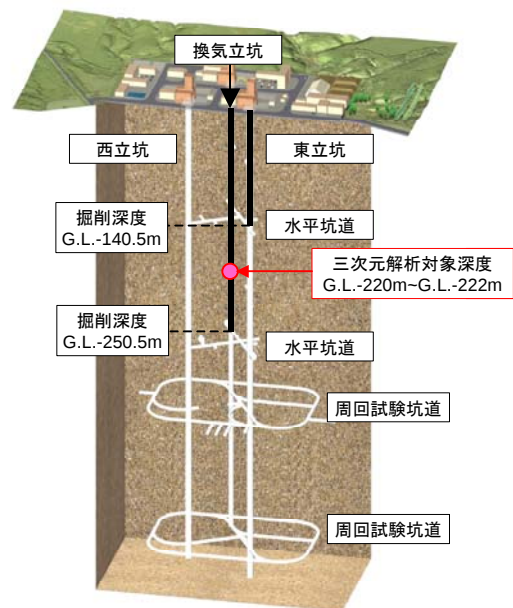
Key Words : shaft excavation, short-step method, concrete lining, three-dimensional analysis

1. はじめに

(独)日本原子力研究開発機構は、北海道幌延町の幌延深地層研究センターにおいて、地下研究施設を建設している。地下研究施設は、図-1に示すように、深さ500m程度の3本の立坑、深さ140mと250mに立坑間を連絡する水平坑道および300m以深の周回試験坑道が計画されている。現在、換気立坑、東立坑および西立坑の3本の立坑のうち、西立坑を除く2本の立坑をショートステップ工法により施工中である。

立坑の標準的な工法である本工法は、以下のような点で、一般的なNATMによるトンネル掘削とは異なる。NATMによるトンネル掘削では、吹付けコンクリート、ロックボルトおよび鋼製支保工等を支保部材とする。覆工コンクリートは、トンネル掘削後、支保工により地山の变形が収束した後に打設することが一般的であり、地山条件が著しく悪いなど特殊な場合を除き、設計上は覆工コンクリートに荷重は作用しないと考える。一方、ショートステップ工法では、覆工コンクリートが主な支保部材であり、掘削後ただちに切羽の側面に覆工コンクリートを打設して坑壁を支保する¹⁾。そのため、覆工コンクリートが立坑の掘削に伴う地山の变形を受けて、覆工コンクリートに応力が発生する。

このため、立坑の掘削時に計測される覆工応力や地中変位は、ショートステップ工法に特有の挙動を示している²⁾。例えば、地中変位は立坑壁面近傍の計測点において、切羽の進行に伴い、地山が圧縮するような挙動とな



*今後の調査研究結果により
レイアウト変更の可能性がある

図-1 幌延深地層研究センターにおける地下研究施設のレイアウト

る。これは、基準点とした立坑壁面から半径方向に遠方の地山の方が立坑壁面の計測点よりも、大きく内空側に押し出すような変形を生じ、立坑壁面と基準点間の距離が縮むためであると考えられ、NATMによるトンネル掘削では、ほとんど見られない計測結果である。

このようなショートステップ工法に特有な挙動のメカニズムを解明し、将来の合理的な設計に資することを目的に、これまでに立坑の三次元的な掘削形状を考慮できる二次元軸対称解析による再現が試みられた²⁾。しかし、以下のような課題が残されている。

- 実際の覆工応力の計測結果は、各計測位置で大きく異なっている。この主たる原因は初期地圧の異方性であると考えられるが、二次元軸対称解析では、初期地圧の異方性を考慮することが難しいため、覆工応力の計測結果は再現することができていない。
- 切羽近傍に打設される覆工コンクリートの材齢による力学特性の変化は、覆工コンクリートの応力状態や、立坑周辺岩盤の変形挙動に大きな影響を与えると考えられる。しかし、既報²⁾では、覆工コンクリートの力学特性であるヤング率やポアソン比は材齢によらず一定値としている。

この他、切羽や覆工コンクリートの三次元的な形状も、覆工コンクリートや立坑周辺岩盤の挙動に大きな影響を与える可能性があると考えられる。

そこで、本研究では、ショートステップ工法に特有の挙動を再現することを目的に、初期地圧の異方性や、覆工コンクリートの材齢による力学特性の変化を考慮し、切羽・覆工形状や施工過程をできるだけ忠実に反映した三次元逐次掘削解析を実施した。

以下では、換気立坑を対象とした三次元逐次掘削解析について、その解析手法を概説すると共に、解析結果を計測結果と比較分析し、本解析の適用性について述べる。

2. 換気立坑周辺の地質と施工手順

換気立坑周辺の岩盤は、主として新第三紀堆積岩（珪藻質泥岩および珪質泥岩）からなる。事前調査のボーリングコアによる一軸圧縮試験では、一軸圧縮強さは5MPa～25MPaに分布している³⁾。換気立坑の標準断面を図-2に示す。仕上がり内径は4.5mであり、覆工コンクリートの巻厚は40cmである。

換気立坑の掘削は図-3に示すような、ショートステップ工法で行われる。まず、(a)に示す基準状態から、1mの掘削を行う{(b)}。次に、ロックボルト、鋼製支保工を設置した後、さらに1mの掘削を行う{(c)から(d)}。ロックボルト、鋼製支保工を設置した後、2.0mの覆工コンクリートを打設する{(e)から(f)}。覆工コンクリートの養生後、覆工下面の覆工型枠を脱型し、次の掘削に

移る{(a)に戻る}。

この施工手順において、掘削後すぐに打設する巻厚40cmの覆工コンクリートが、さらに掘削する際に発生する地山の変形を受け、覆工コンクリートに応力が生じる。この場合、覆工コンクリートの材齢による力学特性の変化と掘削を再開する時期の関係が、覆工応力ならびに地山の変形挙動に大きな影響を与えると考えられる。

また、本工法の場合、覆工コンクリートは上方から順に逆巻きによって打設される。そのため、打設継ぎ目には後続の覆工打設時のコンクリートの投入口となる切欠き部ができる。この切欠き部は、覆工コンクリートの一打設長2.0mのうち、最も切羽に近い位置にできるため、切欠きによる断面欠損部に応力集中を生じる可能性があると考えられる。

一方、鋼製支保工は一連の施工手順において、覆工コンクリートが打設されるまでは、上部支保工から治具により吊下げられた状態であり、掘削壁面とは接していない。そのため、覆工打設後に、覆工コンクリートと一体となり支保効果を発揮する。

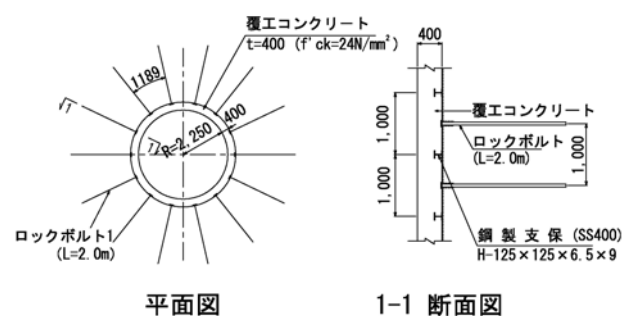


図-2 換気立坑 GL-220m の標準断面と支保パターン

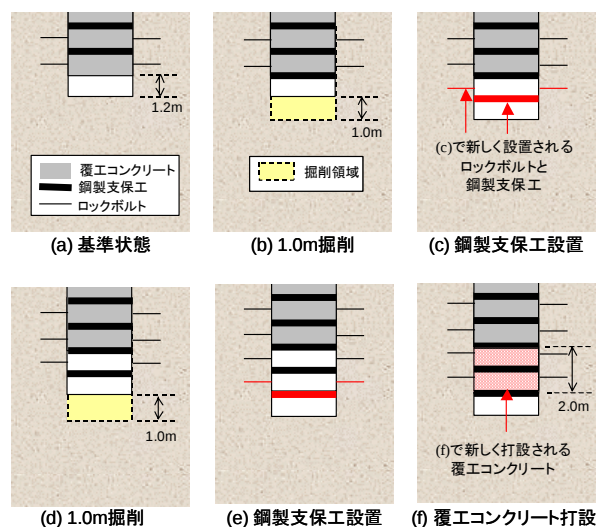


図-3 ショートステップ工法の施工手順の概要

3. 三次元逐次掘削解析の手法

三次元逐次掘削解析には、地盤用有限差分解析コードである FLAC3D (Ver3.1) を用いた。解析で再現対象としたのは、覆工応力および地中変位の計測が実施された、図-1に示す換気立坑の G.L.-220m～G.L.-222m である。

(1) 解析モデル

解析モデルは、再現対象とした深度の覆工コンクリートや立坑周辺岩盤の挙動に境界条件が影響を与えないように、側方の境界を立坑壁面から 5D (D:掘削径 5.5m) 以上離れた位置とし、上下の境界を再現対象とした深度から 8D 以上離れた位置とした。

図-4に解析モデルの切羽周辺部の拡大図を示す。本解析モデルでは、覆工コンクリートをソリッド要素でモデル化した。これは、切欠き部を表現するためと断面内の覆工応力の分布を詳細に分析するためである。また、覆工コンクリートは、設計上の巻厚は 40cm であるが、解析上は、実際の施工に近いように余掘りも含めて 50cm とした。

鋼製支保工は、ビーム要素でモデル化した。ただし、2章に述べたように、鋼製支保工は覆工打設後から支保効果を発揮すると考えられるため、解析では、覆工打設と同時に2基の鋼製支保工を設置することとした。

ロックボルトは、主に地山を一体化することに寄与すると考え、解析上はモデル化していない。

切羽は実際の掘削形状を考慮し、立坑中心部が常に先行するような形状とした。

(2) 地盤物性値

地盤は Mohr-Coulomb の破壊規準に従う弾完全塑性体とした。解析に用いた地盤物性値は、事前に実施したボーリング孔での孔内載荷試験やボーリングコアを用いた三軸試験結果などから推定される G.L.-220m の値として、表-1のように設定した。また、初期地圧は、地表からの調査ボーリング孔における水圧破碎試験結果を参考にし、 σ_v (鉛直) : σ_{Max} (東西) : σ_{Min} (南北) = 1.0 : 1.3 : 0.9 と設定した⁴⁾。

(3) 覆工コンクリートの材齢による力学特性の変化

2章でも述べたように、覆工コンクリートの材齢による力学特性の変化は、覆工の応力状態や変形挙動に大きな影響を与えると考えられる。そこで、覆工コンクリートのヤング率およびポアソン比は材齢変化を考慮して、以下のように設定した。

a) ヤング率

覆工コンクリートのヤング率は、土木学会コンクリート標準示方書「施工編」に準拠し、図-5に示すような材

齢変化を考慮した。材料は早強ポルトランドセメントであり、対象とする G.L.-220m～G.L.-222m 付近における覆工コンクリートの設計基準強度は 24N/mm²である。

b) ポアソン比

打設直後のコンクリートの側圧は、骨材粒子の内部摩擦やセメントペーストの粘性などにより単純には求める

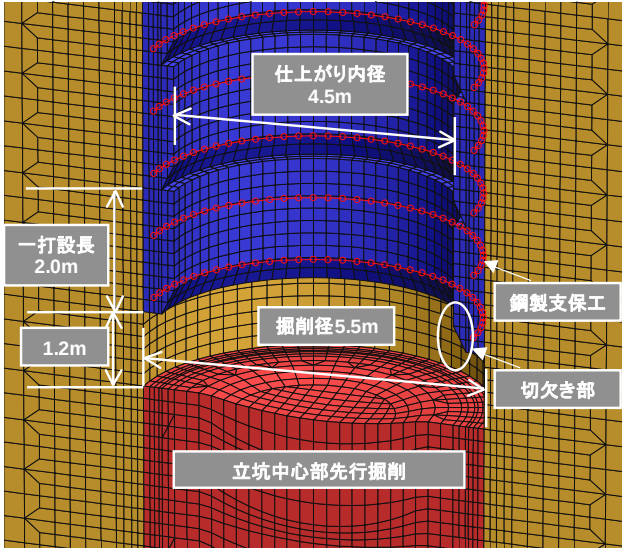


図-4 解析モデルの切羽周辺部の拡大図

表-1 解析用地盤物性値

	地盤物性値	備考
変形係数(MPa)	700	
ポアソン比	0.13	
粘着力(MPa)	1.24	
内部摩擦角(°)	12.5	
ダイレーション角(°)	4.0	
引張り強度(MPa)	0.47	
単位体積重量(kN/m ³)	15.3	G.L.-220mでの値 ^{*1}
初期地圧 ^{*2}	σ_v (MPa)	3.19 鉛直方向
	σ_{Max} (MPa)	4.15 東西方向
	σ_{Min} (MPa)	2.87 南北方向

(注)

^{*1} 単位体積重量および初期地圧は深度依存する値として入力した

^{*2} 初期地圧の比は $\sigma_v : \sigma_{Max} : \sigma_{Min} = 1.0 : 1.3 : 0.9$

ヤング率(GPa)

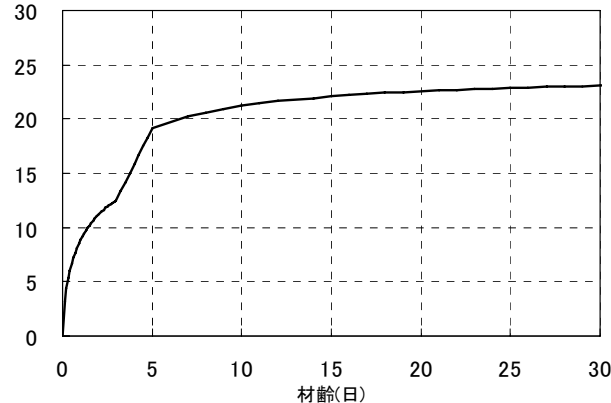


図-5 覆工コンクリートのヤング率の材齢変化

ことができない。しかし、型枠設計用のコンクリート側圧の最大値としては、液圧相当（すなわち、側圧係数1.0）を見込んである。そこで、覆工打設直後は掘削壁面および型枠に液圧相当の荷重が加わると考え、ポアソン比を0.5とした{図-3の(f)に相当}。覆工打設後の掘削再開時{図-3の(a)に相当}には、ある程度硬化すると考え、通常の硬化コンクリートの設計に使われる0.2とした。

(4) 解析ステップ

図-3に示す実際の施工手順をできるだけ忠実に反映した解析ステップとした。また、実際の作業工程から、平均的な施工時間を算出し、1mの掘削に0.75日、覆工打設および養生に0.5日要するものとした。すなわち、図-3の(a)~(f)までの1施工サイクルを2日で実施するものとした。

4. 計測結果と解析結果の比較と分析

(1) 地中変位

図-6に G.L.-221.6m の西方向における地中変位の計測結果と解析結果を示す。なお、換気立坑での地中変位は、立坑壁面から半径方向に4.0mの位置を基準として、各計測点との相対変位で評価している。また、解析結果は実際の計測開始時期と同様に、覆工打設直前からの地中変位である。

一般的なNATMによるトンネル掘削の場合、切羽の進行に伴って、トンネル壁面に近い地山ほどトンネル内空側に大きく変形する。そのため、トンネル壁面に近づくほど、引張側の地中変位が大きくなる傾向となる。しかし、図-6に示すように、換気立坑では立坑壁面に近い位置で圧縮側の地中変位が大きく、切羽の進行に伴い圧縮側の地中変位が増大する傾向がみられる。解析では、計測結果との絶対値の差はあるが、立坑壁面近傍において圧縮側の地中変位が増加する傾向について、ある程度再現することができた。

そこで、このような地中変位の挙動となるメカニズムについて解析結果を用いて考察する。図-7にG.L.-220.0m~G.L.-222.0mの覆工打設直前から切羽離れ1Dまで掘削した時における、地盤の絶対変位の増分コンターを示す。また、図-8にG.L.-221.6mの西側における覆工打設後の地盤の絶対変位（切羽離れ1D、2Dおよび3D）を示す。

仮に、覆工コンクリートを打設しない場合を想定すると、立坑掘削に伴う地盤の内空側への変位量は、立坑壁面が最も大きく、立坑壁面から半径方向に遠方になるほど小さくなる。しかし、図-7および図-8では、立坑壁面近傍の内空側への変位量が、立坑壁面から半径方向に4.0mの位置よりも小さくなっている。このため、立坑壁面から半径方向に4.0mの位置を基準とした相対変位とし

て評価する地中変位は、立坑壁面近傍で圧縮側となる。

このように、立坑壁面から半径方向に遠方の位置の変位量が立坑壁面位置の変位量よりも大きくなる原因を以下に考察する。

図-9にG.L.-221.6mの西側を対象とした、地盤の絶対変位の経距変化を示す。同一平面における、立坑壁面位置と立坑壁面から半径方向に4.0mの位置の内空側への変位量を比較すると、掘削に伴う変位の増加傾向が異なる。すなわち、立坑壁面位置では、切羽到達後に急激に変位が増大するが、覆工打設後に発生する変位は打設前に比べて非常に小さいことがわかる。これは、ショートステップ工法では、掘削後すぐに剛性の高い覆工コンクリートを打設するため、立坑壁面位置では、内空側への変位

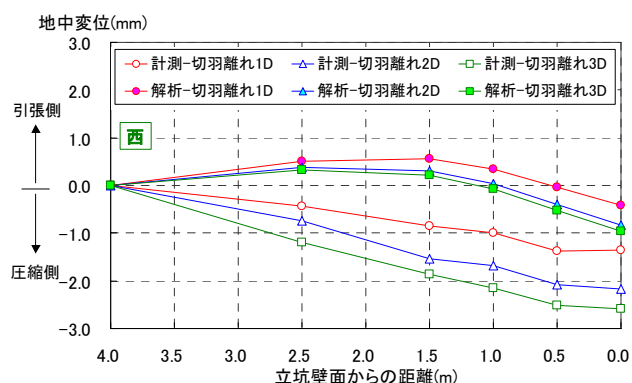


図-6 地中変位の計測結果と解析結果 (G.L.-221.6m)

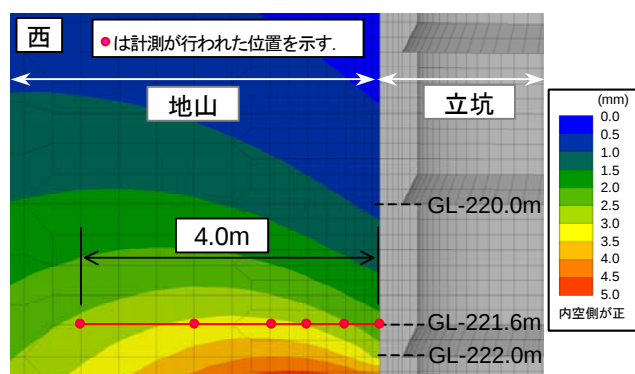


図-7 覆工打設後から切羽離れ1Dまでにおける地盤の絶対変位の増分コンター

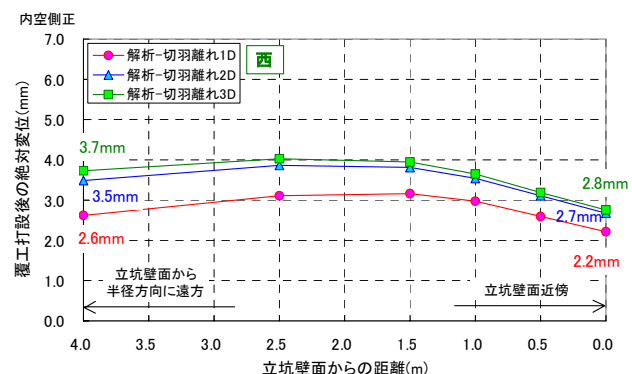


図-8 覆工打設後の地盤の絶対変位

が大幅に抑制されることが原因であると考えられる。一方、立坑壁面から半径方向に4.0mの位置では、変位が比較的緩やかで単調な増加傾向を示すことがわかる。この結果、地盤の変位がほぼ収束する切羽離れ3D時までに発生する覆工打設後の変位は、立坑壁面から半径方向に4.0mの位置で3.7mm ($10.4-6.7=3.7$) であり、立坑壁面位置の2.8mm ($23.6-20.8=2.8$) よりも大きくなる。

(2) 覆工応力

図-10に G.L.-221.3m における覆工応力の計測結果と解析結果を示す。図中に緑で示す値は、切羽離れ 3D における計測結果である。

計測では、切羽の進行に伴い、覆工応力が増加する傾向が見られる。また、南西位置では局所的に大きな覆工応力が計測された。これは、掘削壁面の凹凸により覆工コンクリートの地山側の面に凹凸が生じたことや、南西位置の覆工背面に局所的に物性の異なる地山が存在したことなどにより、その位置の覆工コンクリートに応力集中を生じたことが原因であると推察される。

一方、解析では、初期地圧の最大主応力軸を東西方向としたため、覆工コンクリートの南北位置で最大圧縮となる応力分布である。局所的に大きな応力が発生した南西位置以外では、解析結果は計測結果とほぼ同程度の応力であるため、地中変位と同様に、ある程度解析により実際の覆工応力を再現することができたと考えられる。

そこで、覆工コンクリートの断面内および深度方向での応力分布について、解析結果を用いて考察する。図-11に G.L.-220.1m と G.L.-221.9m における内縁応力・外縁応力の解析結果を示す。

G.L.-220.1m では、内縁側の覆工応力は南北位置に最大値を持つ応力分布となるが、外縁側では東西位置に最大値を持つ応力分布となる。また、内縁側では東西位置に、絶対量は小さい (0.35N/mm^2) もの、引張応力が発生している。切欠きによる断面欠損部を含む G.L.-221.9m では、内縁側と外縁側ともに南北位置が最大となる応力分布であるが、内縁側と外縁側の最大値を比較すると、38%程度 ($10.71/7.74=1.38$) 内縁側の方が大きい。

これらは、初期地圧の異方性に起因して曲げモーメントが発生するためと考えられる。すなわち、初期地圧の最大主応力軸が東西方向であるため、覆工コンクリートが南北方向よりも東西方向から大きな荷重を受けて、東西位置では内空側引張、南北位置では地山側引張の曲げモーメントを生じたことが原因であると考えられる。このように、覆工応力の分布は、初期地圧の異方性に大きく影響され、巻厚 50cm の断面内において、かなり異なることがわかった。

次に、G.L.-220.1m と G.L.-221.9m の覆工応力の分布を比較すると、G.L.-221.9m に生じている圧縮応力がかなり大

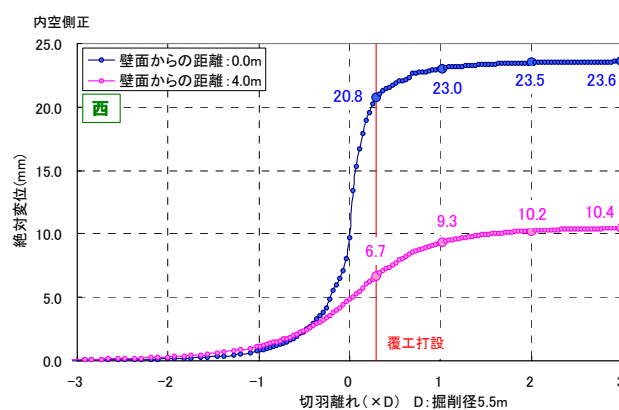


図-9 地盤の絶対変位の経距変化

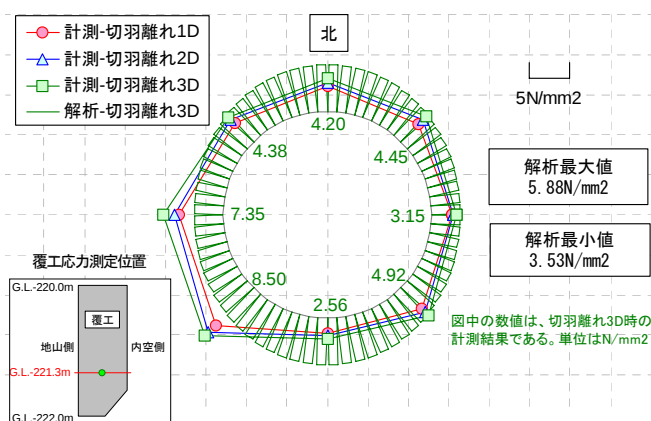


図-10 覆工応力の計測結果と解析結果 (G.L.-221.3m)

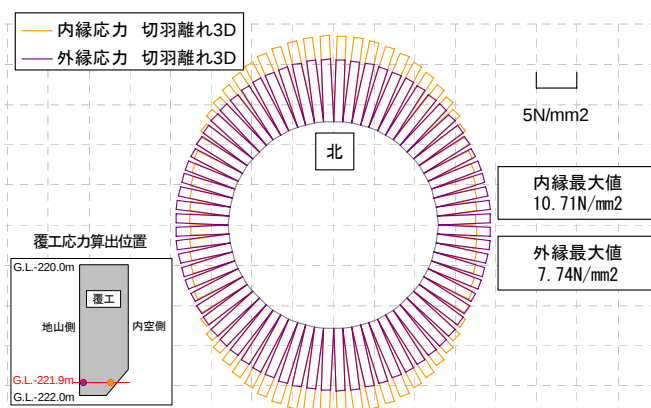
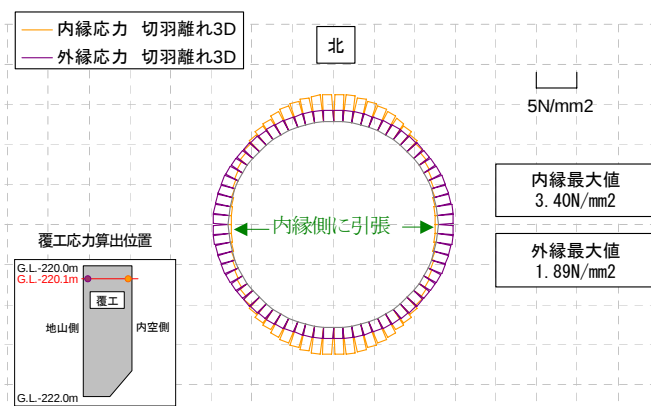


図-11 覆工コンクリートの内縁・外縁応力解析結果 (G.L.-220.1m (上) と G.L.-221.9m (下))

きいことがわかる。これは、以下のように説明することができる。覆工打設時の切羽からの距離が覆工コンクリートの上面と下面で 2m 離れている事により、覆工打設後に、覆工コンクリートが地山から受ける変形量は、下側の GL-221.9m 位置の覆工コンクリートの方が大きい。そのため、GL-221.9m 位置に発生する覆工応力は、GL-220.1m と比べて大きくなる。また、GL-221.9m 位置には、切欠きによる断面欠損があるため、応力集中を生じやすい形状であることも原因の一つであると考えられる。

今後、掘削が進むと、覆工コンクリートが地山から受ける変形量は増加する。そのため、覆工コンクリートの断面内や深度方向での応力差は拡大し、覆工上部に生じる引張応力や、切欠きによる断面欠損部に生じる圧縮応力は、さらに大きくなると考えられる。これらは、覆工コンクリートの長期的な健全性を確保する上で重要な検討事項となるため、実際に覆工コンクリートの断面内や深度方向での応力分布やひずみ分布を計測し、本三次元解析で得られた覆工応力の分布の妥当性を検証する必要があると考える。

5. まとめ

本研究では、換気立坑を対象として、初期地圧の異方性や、覆工コンクリートの材齢による力学特性の変化を考慮し、実際の施工をできるだけ忠実に反映した三次元逐次掘削解析を実施した。その結果を以下に示す。

- ・ 換気立坑 GL-221.6m で計測された地中変位は、ショートステップ工法に特有の立坑壁面近傍で圧縮側の地中変位が生じ、その地中変位が切羽の進行に伴って増加するという現象を示していた。三次元逐次掘削解析により、上述の現象を定性的に再現することができた。また、解析結果を分析することにより、地中変位の挙動を詳細に説明することができた。
- ・ 換気立坑 GL-221.3m で計測された覆工応力は、局所的に大きな応力が計測された南西位置以外では、

三次元逐次掘削解析により、ある程度再現することができた。また、解析結果より、覆工コンクリートは初期地圧の異方性により大きな曲げモーメントを生じ、内縁側、外縁側で応力が大きく異なることがわかった。さらに、覆工打設時に切羽からの距離が覆工上面と下面で 2.0m の差があることや、切欠きによる断面欠損部があることで、立坑の深度方向にも覆工応力の分布が複雑に変化する可能性があることが明らかとなった。

今後は、本三次元解析の妥当性を検証するために、覆工コンクリートの断面内または深度方向における、応力分布やひずみ分布を計測し、実際の複雑な応力変化などを解明する必要がある。その上で、今後の予測を行い、施工結果と比較することで、さらなる解析技術の向上と合理的な設計手法の確立を目指したい。

謝辞：本論文では、大成建設が受託した（独）日本原子力研究開発機構の委託研究「幌延深地層研究計画における工学技術の基礎の開発に関する検討（平成20年度）」の成果について一部紹介しました。ここに、（独）日本原子力研究開発機構の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説，土木学会，2006.
- 2) 谷卓也，下野正人，岩野政浩，山本卓也，山崎雅直，真田祐幸：ショートステップ工法における地中変位挙動の評価，第 12 回岩の力学国内シンポジウム&第 29 回西日本岩盤工学シンポジウム，pp319-324，2008.
- 3) 山崎雅直，森岡宏之，羽出山吉裕，津坂仁和：幌延深地層研究計画における立坑掘削の情報化施工と挙動計測，第 12 回岩の力学国内シンポジウム&第 29 回西日本岩盤工学シンポジウム，pp.305-310，2008.
- 4) 木ノ村幸士，小川豊和，青木智幸，山本卓也，松井裕哉，真田祐幸：堆積軟岩地山のひずみ軟化挙動を考慮した立坑の掘削時安定性評価，第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.307-312，2008.

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF CONCRETE LINING AND ROCK MASS DURING SHAFT EXCAVATION

Kazuo SAKAI, Masashi KOIKE, Tomoyuki AOKI, Takuya YAMAMOTO,
Daisuke INAGAKI and Masanao YAMASAKI

In the Horonobe URL construction project, two vertical shafts are being excavated by the short-step method. This differs from NATM in that concrete lining is cast right after the face advance. The measurement results of the concrete lining and rock mass actually show unique phenomena attributed to the method. A three-dimensional analysis is carried out for the interpretation of rock/lining behaviors so as to contribute to a rational design in future. In the analysis, the initial rock stress and the time-dependent variation of mechanical characteristics of the concrete lining are considered. It well demonstrates actual behaviors of stress in the concrete lining with complex distribution both in the radial and axial directions.