

初期地圧の異方性を有する岩盤における支保設計と計測結果に基づく妥当性検証について

本島 貴之¹・矢吹 義生¹・南出 賢司¹・名合 牧人¹・青柳 和平²

¹正会員 大成建設 札幌支店幌延地下施設工事作業所（〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進432-2）

E-mail:mtstky00@pub.taisei.co.jp

²正会員 (独)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字北進432-2）

E-mail:aoyagi.kazuhei@jaea.go.jp

幌延深地層研究計画の一環として堆積軟岩中に周回状の大深度地下施設を建設するにあたり，事前に初期地圧の調査を行って，掘削方向と主応力の方向の関係に応じて支保パターンを変更する経済設計を試みている．さらに筆者らは，施工時において内空変位の計測を行って掘削方向と内空変位計測結果の関係を整理し，事前に調査を行った初期地圧測定結果が妥当であったかを念頭に，計測結果と予測解析結果との比較をおこなった．その結果，両者の間は正の相関が認められ，値の大小についても変形係数の設定値と実測値との差から想定される範囲に収まっていることが確認された．これらのことから，地上からの調査で実施した初期地圧の測定結果はほぼ妥当であるものと確認された．

Key Words : *initial stress, anisotropy, tunnel support design, convergence measurement, sedimentary rock*

1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構は，堆積岩を対象とした高レベル放射性廃棄物の地層処分技術の信頼性向上を目的として，北海道天塩郡幌延町にて，幌延深地層研究計画を実施している．同計画では，深度約 500m のアクセス（東・西）立坑 2 本（内径φ6.5m）と換気立坑 1 本（内径φ4.5m），深度 140m，250m，350m および 500m の調査坑道からなる地下施設の建設が予定されている（図-1 参照）．同計画のうち，地下研究施設工事（第Ⅱ期）等事業を幌延ジオフロンティア PFI（株）が PFI 事業として請け負っている．工事請負業者である大成・大林・三井住友特定建設工事共同企業体は，この幌延ジオフロンティア PFI（株）より平成 23 年 2 月から平成 26 年 6 月までに，換気立坑および東立坑については深度 380m まで，西立坑については深度 365m まで，深度 140m，250m および 350m の調査坑道の掘削工事を請け負い，完了している．

掘削対象となる岩盤は，新第三紀堆積岩であり，深度約 250m までが珪藻質泥岩からなる声間層，それ以深が

珪質泥岩からなる稚内層であり，初期地圧に異方性を有している事が報告されている¹⁾．初期地圧の異方性を有する地山に地下施設を建設する際には，掘削方向と主応力方向の関係によって，内空変位や支保に作用する応力が異なることが想定されている．特に，地下発電所や地下備蓄設備のような大規模空洞を建設する場合には，空洞断面の大きさから地圧の方向に応じて空洞安定性が大きく変わると考えられること，想定されている放射性廃棄物処分施設のような地下深部の長大坑道では，初期地圧方向に応じて変位や応力の発現が小さい坑道レイアウトを選択することで経済的な最適化を図れることから，事前に初期地圧の主応力方向を確認して掘削方向や掘削位置を決めることが重要である．そのため，本施設では設計段階において，掘削方向と主応力方向の関係に応じて支保パターンを変更する経済的な支保設計を試みている¹⁾．なお，空洞安定に影響を及ぼす異方性としては，初期地圧に加えて，変形特性の異方性や断層や割れ目等の不連続構造による異方性も存在するものの，本施設の地質は堆積泥岩であり，花崗岩等に比して不連続構造の発達が少ないことや物性自体の異方性も報告されてい

いことから、まず初期地圧の異方性に着目して報告するものである。

初期地圧に異方性がある岩盤中に周回状の坑道を掘削する場合、初期地圧の方向と掘削方向との関係に応じて、坑道掘削時の応力分布の状況および応力分布に起因する内空変位の大きさが異なってくるものと予想される。また、本施設のような大深度の地下施設は施工事例自体が少なく、300m以深の地下深部に建設された周回状の坑道において、内空変位測定結果を取りまとめて初期地圧状態との関係について検討した事例は見当たらない。

そこで筆者らは、周回状の坑道建設時に、様々な方向の内空変位を計測して、その大小を事前解析結果と比較することで事前に計測した初期地圧の方向や大きさが妥当であるか、また、事前の設計内容が妥当であるか否かを検証することを目的に、施工時において内空変位の計測を行い²⁾ ³⁾、掘削方向と内空変位計測結果の関係を整理し、計測結果と予測解析結果との比較を行った。本報告は特に深度350mに建設した周回状の調査坑道の施工に着目して初期地圧の主応力の方向および大きさと、内空変位の関係について検討を行い、初期地圧を求めた事前調査結果の妥当性についても検討を加え、報告するものである。

2. 地質および初期地圧の状況

幌延地下施設周辺の地質は新第三紀の堆積岩であり、前述のとおり深度約250mまでが珪藻質泥岩からなる声間層、それ以深が珪質泥岩からなる稚内層である。なお、稚内層と声間層の境界については定説はないものの、ここではオパールAからオパールCTの出現をもって稚内層としている。物性としては空隙率が比較的大きい、単位体積重量が小さい、強度が低いという特性がある¹⁾ (表-1参照)。一軸圧縮強度は声間層で5MPa程度、稚内層では最大25MPa程度であり、軟岩に分類される。変形係数は声間層で200～640MPa程度、稚内層では900～1,200MPa程度であった。

また、事前の調査結果から初期地圧に異方性があることが確認されており、土被り相当の土圧に対し、側圧係数として東西方向1.3、南北方向0.9とした¹⁾。

3. 支保パターンの設定

初期地圧に東西方向が卓越する異方性があることから、東西方向の圧縮を受ける南北方向のトンネル掘削時には、内空変位や支保工に発生する応力が大きくなる。この時、

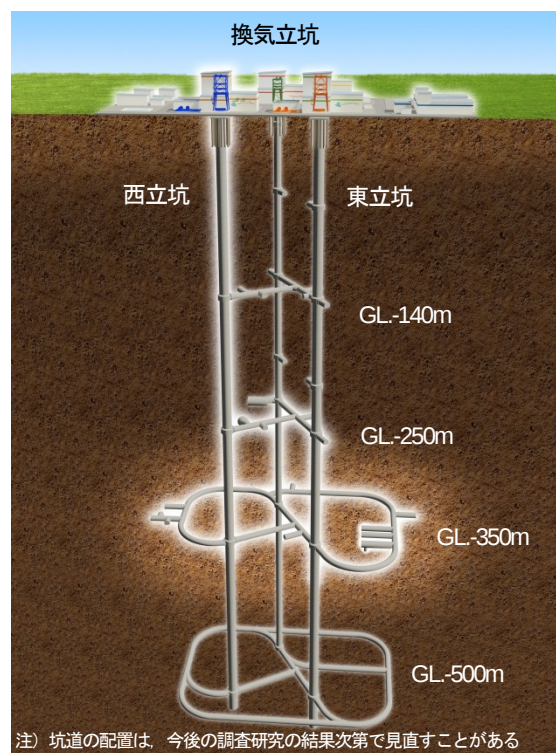


図-1 幌延深地層研究計画における地下施設イメージ図

表-1 岩盤の物理性¹⁾

項目	声間層	稚内層
単位体積重量[kN/m ³]	14~16	16~18
空隙率[%]	60~65	40~50
一軸圧縮強度[MPa]	5程度	5~25
透水係数[m/s]	10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁸	10 ⁻¹¹ ~10 ⁻⁶

表-2 岩盤物性の設定値（抜粋）¹⁾

地層	岩級* (Hr有)	変形係数 [MPa]	粘着力C [MPa]	内部摩擦角 [°]
声間層	CL-H	640	1.5	15
	CL-M	360	0.6	15
	CL-L	200	0.5	15
稚内層	CM-H	1,200	1.6	25
	CM-M	900	1.6	25
	CM-L	400	1.0	25

*: Hr有とはヘアークラックが存在する場合の岩級・物性

表-3 坑道施工時の計測内容^{4),5),6)}

計測分類	計測項目
A計測	内空変位計測 天端沈下計測 切羽観察調査
B計測	地中変位測定 各種支保応力測定 原位置試験・調査 湧水量測定 ボーリングコア観察調査 底盤観察調査 断面形状計測

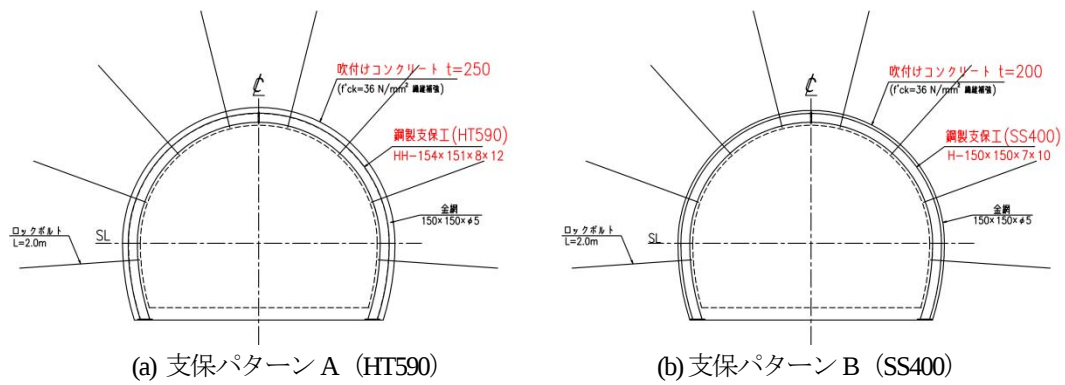


図-2 350m調査坑道の支保パターン

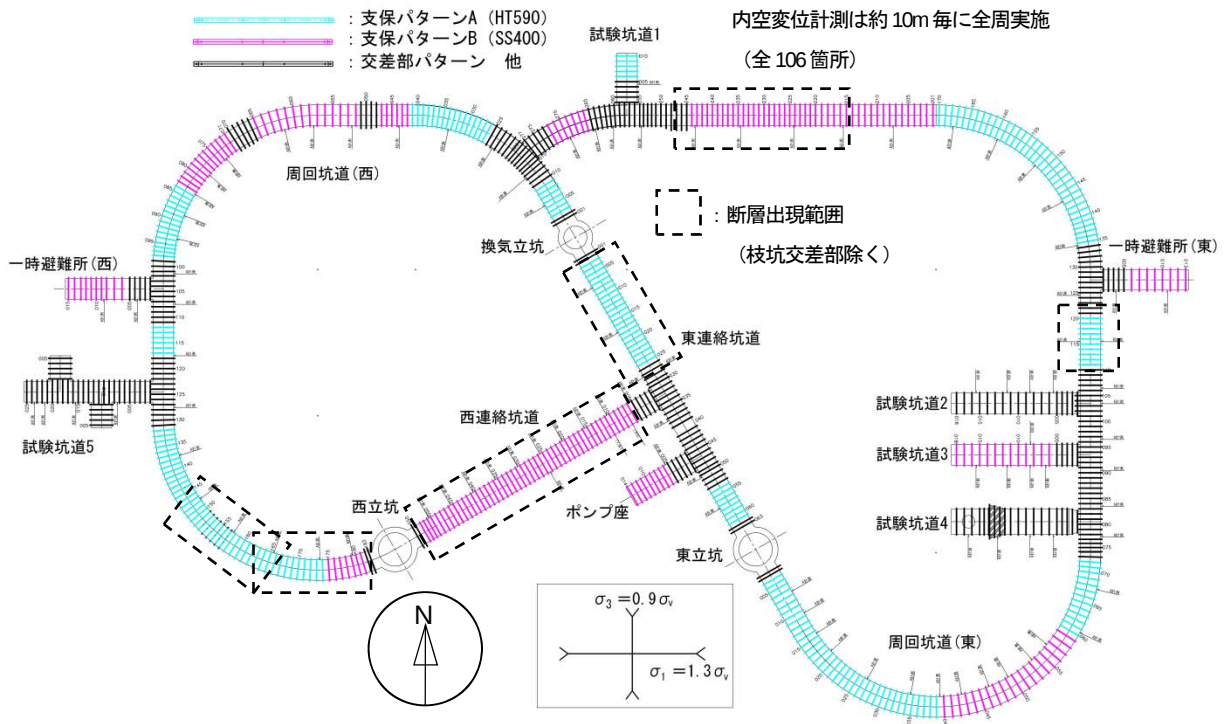


図-3 350m調査坑道平面図

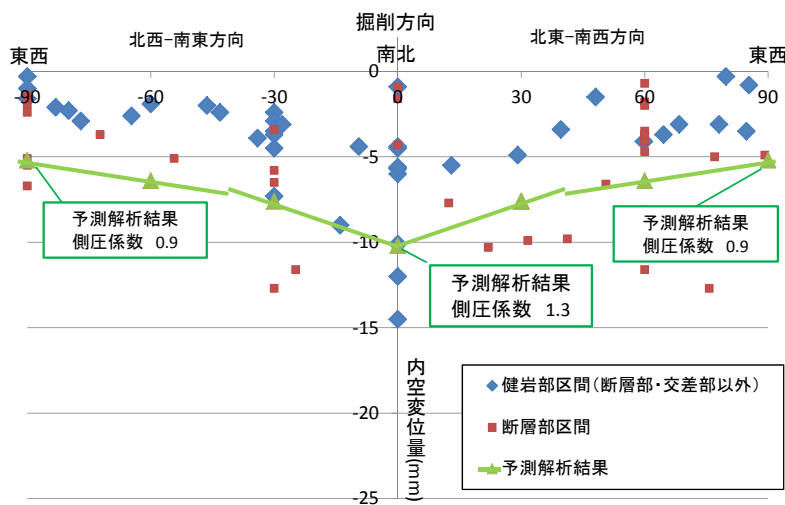


図-4 掘削方向に応じた内空変位計測結果のとりまとめ

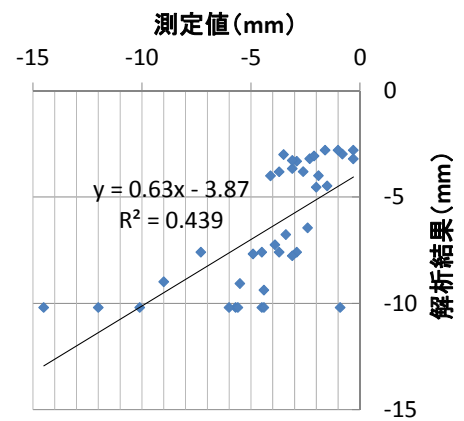


図-5 計測値と解析結果の相関図

南北方向の掘削時に合わせて支保設計を行うと、東西方向の掘削時には過大な支保となると予想される。そこで、方向、すなわち側圧係数に応じた支保設計を試みている。設計のための解析手法としては、2次元平面ひずみモデルによる有限要素法解析を採用した。岩盤の応力-ひずみ関係は弾完全塑性モデルを、破壊基準についてはモール・クーロンの破壊基準を採用した。また、岩盤物性の設定内容を表-2に示す。声間層はCL級、稚内層はCM級を基本とし、割れ目密度の大小によって、それぞれさらにH, M, L級の3段階の岩級に分類している。350m調査坑道における地層は稚内層であり、支保設計の段階では、壁面観察において割れ目の密集部の割合が30%以上の場合に相当するCM-M級の岩盤が最も広く分布するとの想定の下、解析検討を実施した。

上記の解析検討から設定した支保パターン図を図-2に、平面的な支保パターンの配置を図-3に示す。数値解析により支保部材に発現する応力を確認し、最小主応力方向である南北方向に掘削する場合には吹付厚が250mmで高規格支保工を使用した支保パターンA（HT590）、最大主応力方向である東西方向に掘削する場合には吹付厚が200mmで一般支保工を使用した支保パターンB（SS400）を採用することとした。

4. 施工時の計測内容

深度350mの調査坑道施工時は、A計測とB計測を実施している。表-3に計測内容を示す^{4) 5) 6)}。このうち、本報告で着目する内空変位計測については、コンバージェンスメジャーを用いて実施した。使用したコンバージェンスメジャーの読み取り精度は $\pm 0.1 \text{ mm}$ （最小読取値0.1mm）である。

内空変位計測は計測ポイント設置後、切羽進行毎に実施し、計測期間は変位の収束が確認されるまでとした。収束の判定は、計測変位量が3回連続して1mm以内であることを基本として行った。

5. 内空変位計測結果の整理

1) 計測結果の整理

計測した内空変位を縦軸に、掘削方向を横軸にとって取りまとめたグラフを図-4に示す。図-4に示した値は、変位が収束した段階での値である。

このとき、本施設の調査坑道は周回状および枝坑が複数存在する構造であるため、内空変位計測値のうち、枝坑などの交差部から1D（D=掘削径）離れ以内の箇所での計測値は除き、全40か所を取りまとめた。これは、交

差部分での計測値は、先行して掘削する坑道による応力解放の影響を受けるためである。また、内空変位計測箇所が、断層粘土や破砕物が挟在する断層出現区間であるか否かについても着目して取りまとめた。

2) 考察

図-4に示したように、健岩部区間では南北方向掘削時の内空変位量は東西方向掘削時よりも大きいことが分かる。図-5は内空変位量について、横軸に計測値、縦軸に解析値を取って表した散布図である。同図からも計測値と解析値には正の相関があることが読み取られ、解析で表現されている側圧係数の差によって生じる内空変位量の差が計測によっても確認されていると考えられる。また、解析時に想定していた初期地圧の方向も妥当であったものと考えられる。なお、計測値と解析値の相関係数は0.65であった。

一方、値の大小については、数値解析結果の方が計測結果よりも全般的に大きい。この値の差については、初期地圧の大きさや方向によるものよりも、解析時に設定した岩盤物性値よりも実際の現地での変形係数が大きかったことによる影響と考えられる。解析時に設定した変形係数が900MPaであったのに対し、別途原位置で実施した岩盤物性試験から得られた変形係数の値はおよそ1,630MPaと約1.8倍の値であった⁷⁾。この設定した変形係数の差によって内空変位量の解析値が計測値よりも全般的に大きくなっていると考えられる。

断層区間については、健岩部区間と比べて、初期地圧の方向と内空変位量の間に明瞭な関係は認められない。断層部分での岩盤物性低下や不均質性などの影響が初期地圧の異方性の影響を上回っている可能性が考えられる。

6. 結論

本報告では、事前に計測して設計に用いた初期地圧の大きさおよび方向と、その初期地圧の大きさおよび方向から想定していた内空変位解析値の妥当性について検討することを目的として、事前の内空変位解析値と坑道掘削時の計測値との比較を行い、考察を加えた。具体的には、地下深度 350m に建設された調査坑道の内空変位について、掘削方向すなわち初期地圧の方向に応じた整理を行い、予測解析結果と計測値の比較を行った。その結果、両者は正の相関が認められた。また、値の大小については全般的に解析結果の方が大きい値となっているものの、変形係数の設定値と実測値との間にある約 1.8 倍の差から想定される範囲、仮に完全弾性体であれば同じく約 1.8 倍の程度の値となっていることが確認された。これより、地表より実施した初期地圧の測定結果と設定

した初期地圧に基づく設計内容はほぼ妥当と考えられる。今後の検討としては、逆解析や事後解析の手法を用いることにより、坑道内で測定した地圧状態も合わせて初期地圧の把握精度をあげることも考えらる。

参考文献

- 1) 森岡宏之，山崎雅直，松井裕哉，尾留川剛，山口雄大：幌延深地層研究計画における地下施設の支保設計（実施設計），JAEA-Research 2008-009，日本原子力研究開発機構，2008。
- 2) 矢吹義生，工藤元，捻金礎人，橋本祐太，亀村勝美：周回坑道施工時の計測結果を利用した設計初期地圧の妥当性の確認，土木学会第 69 回年次学術講演会，VI-161，2014。
- 3) 南出賢司，矢吹義生，工藤元，橋本祐太，青柳和平：初期地圧の異方性を有する堆積軟岩における周

- 回坑道の支保設計について，土木学会第 69 回年次学術講演会，VI-162，2014。
- 4) 稲垣大介，澤田純之，常盤哲也，津坂仁和，天野由紀，新沼寛明：幌延深地層研究計画 平成 22 年度地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2012-019，2012。
- 5) 稲垣大介，常盤哲也，村上裕晃：幌延深地層研究計画 平成 23 年度地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2012-029，2012。
- 6) 稲垣大介：幌延深地層研究計画平成 24 年度地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2013-022，日本原子力研究開発機構，2014。
- 7) Tsusaka, K., Inagaki, D., Niunoya, S. and Jo, M. : An Investigation on Mechanical Properties of In-situ Rock Mass at the Horonobe Underground Research Laboratory, 8th Asian Rock Mechanis Symposium, PO-15, 2014.

(2014.9.15 受付)

TUNNEL SUPPORT DESIGN FOR ANISOTROPIC STRESS STATE AND COMPARISON BETWEEN IN-SITU CONVERGENCE RESULTS AND CALCULATED RESULTS

Takayuki MOTOSHIMA, Yoshio YABUKI, Masahi MINAMIDE, Makito NAGO and Kazuhei AOYAGI

Economic tunnel support design for Horonobe underground research laboratory was obtained according to the relationship in the direction of the initial stress and the direction of excavation. The authors compared between the *in situ* convergence results and calculated results in order to investigate the validity of initial stress measurements. As a result, a positive correlation was observed between the *in situ* convergence results and calculated results, and the difference between the two was able to be explained by the difference between the assumed deformation coefficient and the measured coefficient. From these results, the measurement results of the initial stress performed in the surface based investigation has been confirmed almost reasonable.