# 周回坑道掘削時の内空変位計測結果に基づく 初期地圧の推定

亀村勝美1\*・藤田朝雄<sup>2</sup>・青柳和平<sup>2</sup>・名合牧人<sup>3</sup>・白瀬光泰<sup>4</sup>・菅原健太郎<sup>5</sup>

 <sup>1</sup>公益財団法人 深田地質研究所(〒113-0021 東京都文京区本駒込2-13-12)
<sup>2</sup>国立研究開発法人 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)
<sup>3</sup>幌延ジオフロンティアPFI株式会社(〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2)
<sup>4</sup>大成・大林・三井住友特定建設工事共同企業体幌延地下施設工事作業所 (〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2)
<sup>5</sup>株式会社地層科学研究所(〒242-0017 神奈川県大和市大和東3-1-6 JMビル4F) \*E-mail: kame@fgi.or.jp

地下深部岩盤構造物の設計に当たっては、対象岩盤の力学特性や初期地圧の設定が重要である.しかし、 その設定に用いるボーリング孔を用いた初期地圧計測は、その方法論、結果の評価法など詳細な議論が行 われているものの、得られた結果のばらつきが大きく岩盤としての初期地圧を設定することは難しい.幌 延の深地層研究施設では、深度350mの周回坑道の掘削時に多くの内空変位計測を行った.そこで、周回 坑道の計測変位を用いて数百m四方の岩盤挙動に対応する初期地圧を推定した.推定結果はこれまでの初 期地圧測定結果と整合するものであり、本手法により岩盤の初期地圧推定が可能であることが示された.

Key Words : initial stress, convergence during tunnel excavation, 3D FEM, Least squares method

#### 1. はじめに

日本原子力研究開発機構が高レベル放射性廃棄物の地 層処分技術開発の一環として北海道幌延町で進めている 幌延深地層研究計画<sup>1</sup>は,平成12 年度から開始された第 1段階「地上からの調査研究」,第2段階「坑道掘削(地 下施設建設)時の調査研究」に引き続き,現在第3段階 「地下施設での調査研究」が実施されている.

この地下研究施設は,図-1に示すように3本の立坑と 調査坑道より構成され,現在深度350mまでの立坑と調 査坑道の掘削が終了し,坑道を用いた様々な調査研究が 実施されている.

こうした地下施設の設計に当たっては, 掘削対象の岩 盤の力学特性や初期地圧の設定が重要であり, 幌延深地 層研究センターにおいてもこれまでに, 地上からのボー リングを用いた水平面内の初期地圧の評価, 坑道掘削

(地下施設建設)時の立坑の深度140mおよび250mの調 査坑道における水圧破砕法とボアホールブレイクアウト 情報による初期地圧の評価が行われている.

ここでは、深度350mの調査坑道掘削時の内空変位計 測結果を用いて、数百m四方の岩盤の変形挙動を説明で きる初期地圧を推定した.この結果と地上からのボーリ ング調査や各深度の調査坑道内で実施した水圧破砕試験 結果を比較し、本手法の適用性を検討した.



※このイメーン図は、今後の調査研究の結果次第で 変わることがあります.

図-1 幌延深地層研究センター地下施設レイアウト

#### 2. 深度350m調査坑道の概要

#### (1) 地質および初期地圧

地下研究施設周辺の地質は新第三紀の堆積岩であり, 調査坑道が掘削された深度350m付近は稚内層と呼ばれ る珪質泥岩からなる.稚内層の物性は,表-1に示すよう に空隙率が大きく,単位体積重量が小さい,強度が低い という特性がある<sup>2</sup>.一軸圧縮強度は5~25MPa程度であ り,軟岩に分類される.支保の設計に当たっては稚内層 をCM-H~L級に分類し,表に示す物性値(ヘアクラッ クあり)を設定した.深度350m付近ではCM-Mが主体 と想定された.

	稚内層				
項目	CM-H	CM-M	CM-L		
単位体積重量(kN/m³)	16~18				
空隙率(%)	40~50				
一軸圧縮強度(MPa)	5~25				
透水係数(m/s)	$10^{-11} \sim 10^{-6}$				
変形係数(MPa)	1,200	900	400		
粘着力(MPa)	1.6	1.6	1.0		
内部摩擦角(°)	25	25	25		

表-1 稚内層の物理性状?)

一方,地上からのボーリングを用いた事前調査結果で は地山の初期地圧は異方性を有している事が報告されて おり<sup>3</sup>,設計に当たっては土被り相当の鉛直圧に対し側 圧係数として東西方向1.3、南北方向0.9と仮定した.

初期地圧の異方性を有する地山に周回坑道を掘削する 場合,掘進方向により坑道断面内の主応力の大きさが変 化するため内空変位やこれに伴い発生する支保応力が異 なる.このため,初期地圧の異方性を考慮した2つの支 保パターンを設定し施工を行った.図-2に調査坑道の平 面と支保パターンを示す.支保パターンAは南北方向に 掘削する場合で,25cmの吹付コンクリートと高規格支 保工(HT590)を,支保パターンBは東西方向に掘削する場 合で,20cmの吹付コンクリートと一般支保工(SS400)を 採用している.

#### (2) 内空変位計測結果

深度350m調査坑道はNATMによって施工され,標準 的なA計測とB計測が実施された.この内,ここで検討 対象とする内空変位計測は,コンバージェンスメジャー を用いて行われ.その読み取り精度は±0.1mm(最少読 み取り値0.1mm)であった.内空変位計測は計測ポイン ト設置後,切羽進行ごとに実施し,計測変位収束まで行った.

計測した最終内空変位を縦軸に、掘削方向を横軸にま とめた結果を図-3に示す.図において「一般部」は設定 した支保パターンA,Bで施工した断面を、「グラウト区 間」は亀裂が多く湧水の懸念された区間で坑道周辺にグ ラウトを実施したため、ロックボルトを施工しなかった 区間である.また図中のデータは、各計測断面における



変位の経時変化と切羽進行の関係から,分岐坑道(枝線)堀削の影響により発生したと判断できる増分変位を 除外し,坑道掘削によると判断される変位のみで整理し ている.また,切羽進行データが不明な断面,変位収束 前において,計測不能となった断面についても除外した.

図から側圧係数が0.9の坑道断面(掘進方向が東西方 向:掘進方向90°と-90°)と1.3の坑道断面(掘進方向 が南北方向:掘進方向180°と0°)を比較すると,平均 の内空変位は東西方向の-3.2mmに対し南北方向は-5.3mm と増大し,反対に天端沈下は東西方向の-2.7mmに対し南 北方向は-0.1mmと減少していることが判る.

ここに示した計測結果は、深度350mでの全方位の調 査坑道掘削時の変位であり、この計測結果全体を分析す ることで、調査坑道を含む広い範囲の岩盤の初期地圧を 推定することができる.

#### 3. 分析対象変位の評価

深度350m調査坑道における掘削時内空変位に基づく 初期地圧の推定に当たっては、3次元弾性のFEMを用い ることとした.したがって検討対象とする坑道の掘削時 変位は、弾性挙動である必要がある.しかし計測された 内空変位の経時変化は必ずしも弾性挙動とはみなせない. 図-4、5に計測結果の一例を示す.

一般に掘削直後から切羽近傍で広範囲に塑性域が生じ るような地山でない限り、切羽近傍の地山は弾性的に挙 動する.そこで図において計測値に3次元弾性解析から 得られる変位の経時変化を重ねた.

図-4では、切羽離れ0.637Dまでは、計測結果は弾性解 析結果と一致したため、この断面は弾性挙動を示したと 判断できる.一方、図-5では、切羽離れ1.5D(=6.3m)から 内空変位は再度増加し始め、弾性解析結果とは重ならな い.したがって、この断面では切羽離れ1D以降では少 なからず非弾性的な挙動があったと推定できる.

以上のような検討をすべての断面に対して実施した結 果,計測開始から2切羽進行(2×1掘進長1m÷掘削径 D4.2m=0.48D)の区間では弾性挙動とみなせると判断 し、この区間での内空変位増分量を分析対象とすること とした.さらに計測断面ごとに計測ポイントの設置位置 が異なっている(0.4~1.3m間に分布)ため、その平均 71cm(=0.169D)を分析対象計測開始位置とし、これに対応 する解放率 $\alpha_A$ と各計測断面の実際の計測開始位置に対 応する解放率 $\alpha_B$ を求め、計測変位に $\alpha_A/\alpha_B$ を乗じるこ とで補正を行った.その結果を図-6に示す.

この結果を見ると、図-3に示した補正前の最終変位分 布で見られたばらつきはかなり減少しており、補正され た弾性変位増分では方位による差が小さくなっている.





図-6 補正後の分析対象変位増分

#### 4. 3次元FEMによる初期地圧の推定

## (1) 推定方法

計測結果(測定値)と弾性解析値を用いて,以下に 示す方法により初期地圧比を推定する.

直交座標系において、各方向毎にモデル境界に荷重P を作用させ初期地圧を設定し、掘削解析を行う.解析か ら得られる任意の坑道壁面の内空変位U<sub>H</sub>と天端沈下Uv を、3方向の載荷条件毎に

$$(u_{H}^{1}, u_{V}^{1})$$
,  $(u_{H}^{2}, u_{V}^{2})$ ,  $(u_{H}^{3}, u_{V}^{3})$ 

とする. ここで,上添字の数字は,境界に作用させた荷 重の方向(1東西方向,2:南北方向,3:鉛直方向)を 示す.

この段階での各方向に作用させる荷重 P は、方向に よらず一定であり、計測値を評価する初期地圧の大きさ は、定数 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ を用いて次のように表す.

$$P_1 = \alpha \cdot P \tag{3.1}$$

$$P_2 = \beta \cdot P \tag{3.2}$$

$$P_3 = \gamma \cdot P \tag{3.3}$$

直交異方応力場における任意の計測点の変位は,各方 向に作用させた荷重による弾性解析結果の線形和であり, 断面iにおける内空変位と天端沈下は,

$$U_{Hi} = \alpha \cdot u_{Hi}^1 + \beta \cdot u_{Hi}^2 + \gamma \cdot u_{Hi}^3 \qquad (3.4)$$

$$U_{Vi} = \alpha \cdot u_{Vi}^1 + \beta \cdot u_{Vi}^2 + \gamma \cdot u_{Vi}^3$$
(3.5)

と表せる.

ここで,計測結果と弾性解析値との誤差は,次式で 定義される.

$$E_{Hi} = u_{Hi}^{m} - U_{Hi}$$
(3.6)

$$E_{Vi} = u_{Vi}^m - U_{Vi}$$
(3.7)

ここで、上添字のmは計測結果を示す.

最小二乗法を適用し,最適解を求める.残差平方和 は,

$$RSS = R = \sum_{i}^{n} \left[ \left( u_{Hi}^{m} - U_{Hi} \right)^{2} + \left( u_{Vi}^{m} - U_{Vi} \right)^{2} \right] \quad (3.8)$$

であるから、この式を展開し、変数 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ でそれぞれ 偏微分すると、これらに関する三元連立方程式が得られ、 これを解くことで $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ が得られ初期地圧比を求める ことができる.

#### (2) 3次元FEM解析

解析メッシュを図-7に示す.周回坑道のモデル化に当たっては、試験坑道などの枝線、立坑については割愛し、 周回坑道および連絡坑道のみを対象とした.テトラ要素を用い、調査坑道周辺は、一辺が50cmとなるよう離散 化した.

解析領域は、境界の影響が調査坑道の変形に影響を及 ぼさないよう坑道壁面から8D(内径D=4.2m)程度とな るように、鉛直方向×東西方向×南北方向=76×256× 191mとした.

解析に用いた岩盤物性値は、深度350m調査坑道周辺 に分布する稚内層の値(表-1)を参照し、弾性係数 1,000MPa,ポアソン比0.186とした.一方、支保工は簡略 化のためパターンA(吹付コンクリートt=25cm,高規格 支保工HT590)のみを対象とし、次式により求められる 等価剛性を有するシェル要素によりモデル化した.なお、 吹付けコンクリートについては、初期変位を用いた分析 であることから弱材齢時の弾性係数を採用した.

等価軸剛性 : 
$$EA = EscAsc + EssAss$$
 (3.9)  
等価曲げ剛性 :  $EI = EssIss$  (3.10)

ここに,

*Esc*: 吹付けコンクリートの弾性係数 *Ess*: 鋼製支保工の弾性係数 *Asc*: 吹付けコンクリートの断面積



図-7 解析メッシュ分割(上:透過全体図,下:周回坑道部)

Ass:鋼製支保工の断面積

Iss:鋼製支保工の断面二次モーメント である.

解析は、はじめに初期地圧を設定した後、Step1として坑道を一括掘削し、掘削相当外力の70%を解放した. 次にStep2で、支保工を付加し残りの30%を解放した.

## (3) 解析結果

解析の結果,  $\alpha$ =0.156,  $\beta$ =0.225,  $\gamma$ =0.169が得られた. これより, 鉛直圧を1.0とした場合の水平2方向の側圧比 と,水平面内の東西方向初期応力を1.0とした場合の南 北方向初期応力比を求めると**表**-2のようになる.**表**-2に は,設計時に仮定した条件も併せて示した.

また,推定された初期応力比を用いて,式(3.4),(3.5) で求めた解析結果と,分析に用いた計測変位を図-8に示 す.解析より得られた水平面内の初期応力は,設計時の

表-2 初期地圧比(設計時と解析結果)

		鉛直	東西	南北
設計時	鉛直1の場合	1.00	1.30	0.90
	東西方向1の場合	-	1.00	0.69
解析結果	鉛直1の場合	1.00	1.43	1.08
	東西方向1の場合	-	1.00	0.75



図-8 解析結果と計測値との関係

仮定よりいずれも大きくなっている. すなわち設計時に 想定した内空変位と比べると,天端(鉛直)変位よりも 内空(水平)変位の方が大きくなっていることを示して いる.

## 5. 考察

幌延深地層研究センターでは、これまでに地上からの ボーリング調査や深度140m, 250m, 350mの調査坑道に おいて、水圧破砕法やボアホールブレイクアウトによる 初期地圧計測が行われた<sup>4</sup>.図-9にその結果に今回の解 析結果を追記したものを示す.

それによると深度350~400mの稚内層中での最大主応 カの土被り圧に対する比は0.73~1.87,最小主応力の土 被り圧に対する比は0.55~1.68となっており,これらの 結果だけから岩盤の初期地圧を推定することは難しい.

これに対し、今回の推定結果は周回坑道全体の掘削時 挙動を代表するものであり、かつその他の初期地圧計測 結果とも矛盾するものではない.

一方,図-8を見ると解析結果は全体の変位分布状況を 反映しているものの,個々の掘進方向での計測結果は大 きくばらついている.この理由について考察する.



図-9 既往の初期地圧計測結果と今回の解析結果 (文献4)に示された図に加筆)

[内空変位計測の品質]

内空変位計測結果は、計測ポイントの設置位置、その 方法に大きな影響を受ける.今回の検討に当たっても計 測開始位置の違いに対する補正を試みたが、十分とは言 えない.また内空変位計測は、計測者の経験に依存する することも多い.一方、図-8の(a)と(b)を比較すれば明ら かなように、コンバージェンスメジャーによる水平変位 計測(読み取り精度0.1mm)に対し、レベル測量器によ る天端沈下の精度は1オーダー近く低い.このため、天 端沈下が正しく評価されていない可能性がある.

天端沈下計測の精度を水平変位と同等とするとともに、 内空変位計測作業の手順を詳細にルール化することによって内空変位計測全体の品質を向上させる必要がある.

[岩盤物性の不均一性]

今回の解析では分析対象の計測データを多くするため に、一般部とグラウト区間とを区別することなく用いた.

しかし, グラウト区間での変位は一般部に比べ全体的 に大きく, この部分での岩盤物性が一般部より小さかっ たことが推定される.この点に関しては、計測データを より詳細に分析した上で3D解析モデルにおいてグラウ ト区間を脆弱部としてモデル化することにより評価可能 と思われる.

[初期地圧の不均一性]

そもそも解析対象とした領域で初期地圧が不均一であった可能性がある.これまでも初期地圧の計測結果のばらつきについては多くの議論がなされ、岩盤の不均質性や地形などの影響もその原因の一つとして挙げられている<sup>5</sup>.不均一性の評価は今後の大きな課題である.

#### 6. おわりに

ここでは、深度350mの周回坑道において計測された 内空変位計測結果を用い、広域の岩盤初期地圧を評価す ることを試みた.結果はこれまでの初期応力計測結果と 矛盾するものではなく、新たな手法として有望と考えら れる. 今後、さらに詳細な検討を加え、有効な手法の確 立を図りたい.

#### 参考文献

- 1) 花室孝弘編: 幌延深地層研究計画 平成 26 年度調査 研究成果報告, JAEA-Review 2015-017, 2015.
- 2) 森岡ほか: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, 2008
- 3) 太田久仁雄ほか:幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書分冊 「深地層の科学的研究」,JAEA-Research 2007-044, 2007
- Aoyagi et al.,: A study of the regional stress and the stress state in the galleries of the Horonobe Underground Research Laboratory, 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, Sendai Japan, 2013
- 5) 長ほか:我が国における地下岩盤内の初期応力状態-応力解放法による実測データに基づく-,地質調査研 究報告,第60巻,第7/8号,pp.413-447,2009

# ESTIMATION OF INITIAL STRESS BASED ON THE CONVERGENCE MEASUREMENT RESULT DURING TUNNEL EXCAVATION

# Katsumi KAMEMURA, Tomoo FUJITA, Kazuhei AOYAGI, Makito NAGO, Mitsuyasu SHIRASE and Kentarou SUGAWARA

How to estimate the initial stress state as well as a mechanical characteristic of rock mass is important in the design of deep underground structures. Some stress measurement methods using borehole, which methodology and evaluation method have been discussed in detail, are carried out if necessary. However, obtained results are often varying widely, so the evaluation of initial stress is difficult.

Here, the initial stress state corresponding to the rock mass behavior of about  $120m \times 200m$  area is evaluated using the convergence measurement results during tunnel excavation in 350m depth. Analysed result corresponded to that of other method, so the validity of the proposed method was shown.