

周回坑道掘削時に取得された内空変位と 切羽観察結果に基づく初期地圧評価手法の開発

亀村勝美^{1*}・青柳和平²・名合牧人³・菅原健太郎⁴

¹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)

²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)

³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)

⁴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

大規模な地下施設の建設に当たっては、掘削対象岩盤の力学特性とともに適切な初期地圧を設定することが重要となる。堆積軟岩を対象とする幌延深地層研究センターにおいては、地上からのボーリング孔や地下調査坑道において実施した水圧破碎試験や応力解放法により初期地圧状態の評価を行ってきた。ここでは、設計段階において推定された初期地圧状態の妥当性を検討するため、深度350mの周回坑道掘削時の内空変位と切羽観察記録を活用し、断層等の不均質性を考慮した数百m四方の数値解析モデルを構築し、坑道で計測された内空変位を説明できる初期地圧状態を評価した。評価結果は、他の計測結果と整合的であり、地下施設建設段階における初期地圧状態の妥当性の確認手法として適用できる可能性が示された。

Key Words : *In situ stress, Convergence, 3D FDM, Least squares method, Heterogeneity*

1. はじめに

国立研究開発法人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¹⁾では、図-1に示すような地下研究施設が建設されている。施設は3本の立坑と調査坑道より構成され、深度350mまでの立坑と調査坑道の掘削が完了しており、現在は坑道を用いた様々な調査研究が実施されている。

このような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とともに初期地圧の設定が重要である。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調査における水圧破碎試験法による水平面内の初期地圧の評価²⁾、坑道掘削（地下施設建設）時の立坑の深度140m、250mおよび350mの調査坑道における水圧破碎法による初期地圧の評価が行われている。

しかしこうした手法による初期地圧計測結果は、様々な原因からばらつくことが多く、岩盤マスとしての初期地圧を決めることは難しい。そこで著者らは、深度350mの周回坑道掘削時の内空変位計測結果を用いて、調査坑道を含む数百m四方の岩盤の変形挙動を説明できる初期地圧の推定手法を構築し、適用性を検討してきた

234)。推定された初期地圧状態は、地上からの調査ボーリング孔や各深度の調査坑道内における水圧破碎試験結果と整合的であり、手法の適用性は確認できた。

一方で初期地圧の推定精度を向上させるための課題として、内空変位計測の精度向上や、断層などの地質不均

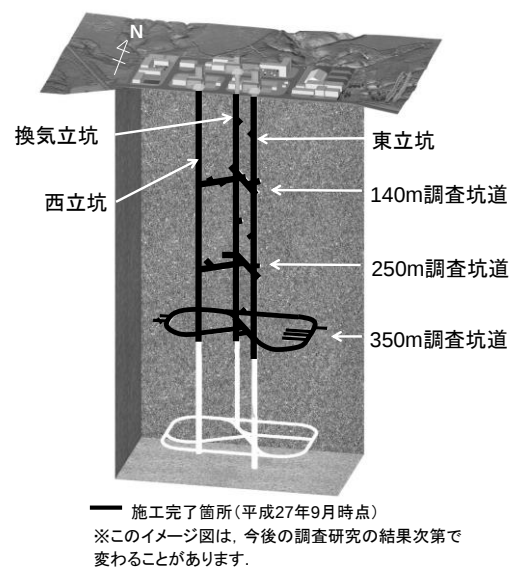


図-1 幌延深地層研究センター地下施設レイアウト

質部が内空変位のばらつきに及ぼす影響の評価などが挙げられた⁴⁾。そこで、本報では、350m調査坑道掘削時に実施された詳細な切羽観察により得られた不連続面に関するデータを評価し、地質の不均質性を考慮した解析モデルを構築し、初期地圧の推定手法の高度化を試みた。

2. 深度350m調査坑道の概要

(1) 地質および設計時初期地圧

地下研究施設周辺の地質は新第三紀の堆積岩である。調査坑道が掘削された深度350m付近を構成する珪質泥岩（稚内層）は一軸圧縮強度は5～25MPa程度であり、軟岩に分類される²⁾。

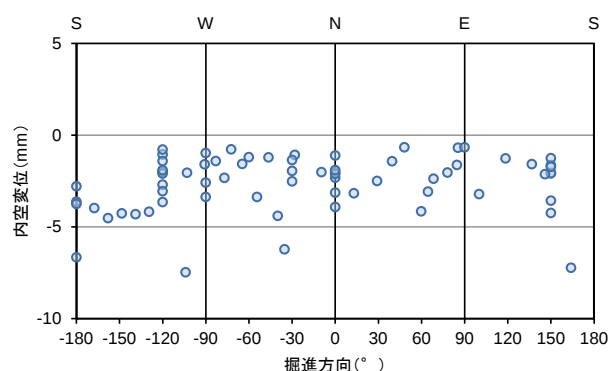
一方、地上からのボーリング調査における水圧破碎試験の結果から、地山の初期地圧は異方性を有している事が報告されている⁵⁾。設計に際しては、調査結果に基づき、岩盤の密度から推定した土被り相当の鉛直圧に対し、側圧係数として東西方向1.3、南北方向0.9を設定した。

(2) 内空変位計測結果

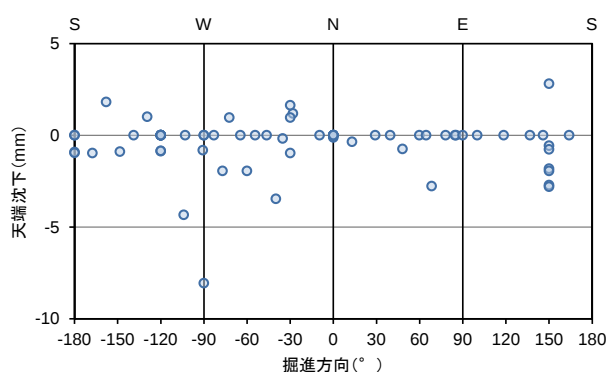
深度350m調査坑道はNATMによって施工され、標準的なA計測が実施された。A計測の内空変位計測の内、水平内空変位はコンバージェンスメジャーを用いて行われ、その読み取り精度は±0.1mm（最小読み取り値0.1mm）であった。一方天端沈下計測はレベル測量によって行われ、その精度は±1mm程度であった。内空変位計測は、計測ポイント設置後、切羽進行ごとに実施し、計測変位が収束するまで継続した。

各計測断面の内、切羽進行データが不明な断面、変位収束前に計測不能となった断面については分析対象外とした。また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）掘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を抽出した²⁾。

こうして得られた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次元弾性の有限差分法(FDM)を用いる。したがって検討対象とする坑道の変位は、弾性挙動でなければならない。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。しかし、計測された内空変位の経時変化を見ると、必ずしも弾性挙動とはみなせない断面も存在した。そこで各計測断面について計測値の経時変化と3次元弾性解析から得られる変位の経時変化を比較し、弾性成分の抽出を行った²⁾。この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。



(a) 水平変位増分



(b) 鉛直変位増分

図-2 補正後の分析対象変位増分

さらに計測断面ごとに計測ポイント設置位置の違いによる増分変位量の割合を求め、すべての計測内空変位が同等となるように補正を行った²⁾。補正方法の詳細については、既報²⁾³⁾を参照されたい。補正結果を図-2に示す。また、補正された内空変位値と計測箇所の対応を図-6に示す。図-2より、計測値のばらつきはあるものの内空変位は、南北方向に掘進している場合に大きく、設計時に仮定した初期地圧の異方性に対応していることが判る。

周回坑道という利点を活かして全方位の調査坑道掘削時の内空変位を取得することが可能であったため、計測結果を評価することで、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. 地質観察結果に基づく計測結果の評価

地下研究施設の立坑や調査坑道の建設時に実施された切羽観察や地表からの調査によって想定される350m調査坑道近傍の地質状況を図-3に示す。350m調査坑道の地質を構成する稚内層は、塊状で概ね均質な珪質泥岩である。主要な断層として、S1：北西-南東走向・35-55° 南西傾斜、F1：北東-南西走向・30-45° 北西傾斜の2系

統が卓越する．また350m調査坑道西側では，多くの断層や不連続面（割れ目）が集中している事が確認された．これを，便宜的にN1断層群と標記する．

これらの断層や割れ目が岩盤物性に及ぼす影響を検討するために，350m調査坑道の切羽と坑壁の詳細な地質観察により得られた不連続面データを表-1に示す基準で分類し，それぞれのカテゴリーの不連続面のトレース長の総和を求めた．そして，これに開口幅を掛けた不連続面の面積の和が評価対象とする領域に占める割合 α を求め，対応する内空変位との関係について検討した（図-4）．図より， α が大きくなるとともに内空変位が増大する傾向が認められるものの，ばらつきは大きく具体的な評価は難しい．

一方350m試験坑道掘削時には，各切羽においてエコーチップ計測が実施されている⁷⁾．計測に当たって供試体はこぶし大とし，目視上新鮮な割れ目のないものを選択している．したがってその結果は，無傷の岩盤の強度を反映していると考えられる．そこでエコーチップ計測値を指標として岩盤の強度特性を評価した．

エコーチップ計測値を便宜的に三谷ほか⁸⁾による次の換算式により一軸圧縮強さ q_u に換算した．

$$q_u = 0.15 \times L - 17.91 \quad (1)$$

ここで， L はエコーチップ測定値である．この式により得られた q_u は，53.6～68.7 MPaであった．

図-5に各切羽で複数得られたエコーチップ計測に基づく強度の平均値と α および内空変位との関係を示す．横軸に α ，縦軸に q_u ，プロットされた点から延びる線分の長さは変位量，その方向は断面の方向を表している． α と q_u の関係を見ると， α の大きいものは低い強度を示している．これは規模の大きな不連続面が形成される過程

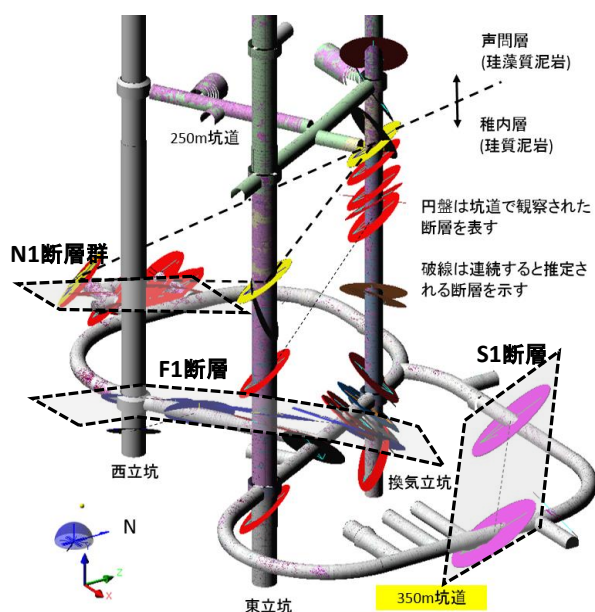


図-3 深度250～350mの地質構造

で岩片内に微小割れ目が形成され，強度を低下させたためと考えられる．

q_u と変位の関係について見ると， q_u の低いものは変位量が多い傾向が認められるものの，比較的 q_u の大きな断面においても変位量が多いものもあり，明瞭な関係を見出すことは出来ない． q_u の変化幅53.6～68.7 MPaは変位量の大小に対して有意な幅ではないと考えられる．これに対し α と変位および方位の関係には比較的明瞭な関係が認められる． α の大きいものは変位が多い傾向にあり，また小さい α でも切羽面方位が東西方向のものは，変位が多い傾向にある．

以上より α の値によって地質を分類することとし，図-5に示す α の閾値を設定した．そして350m調査坑道における地質を，表-1に示すFが卓越する区間で $\alpha > 1.5$ である

表-1 観察された不連続面の分類

	Type	Aperture
F	Fault	1 mm to 0.4 m with fault breccia or gouge
S	Shear fracture	1 mm with clay
TS	Tensile shear fracture	$\ll 0.1$ mm
ST	Sheared tensile fracture	$\ll 0.1$ mm
T	Tensile fracture	$\ll 0.1$ mm
ex	Damages due to excavation (Exfoliation or EDZ fracture)	$\ll 0.05$ mm

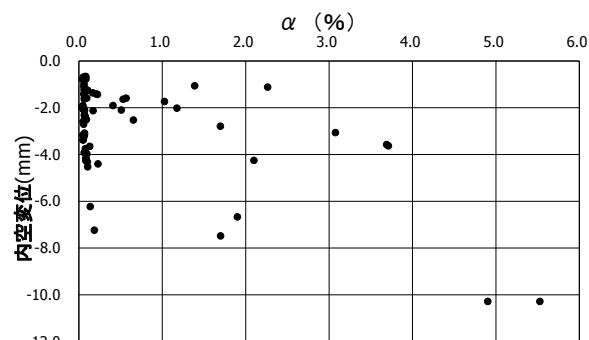


図-4 α と内空変位の関係

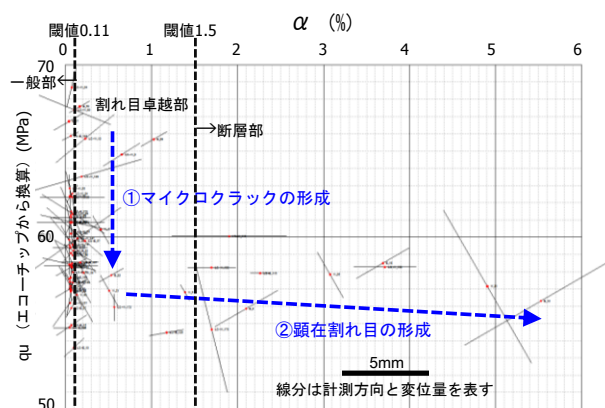


図-5 岩石のインタクト強度と α の関係

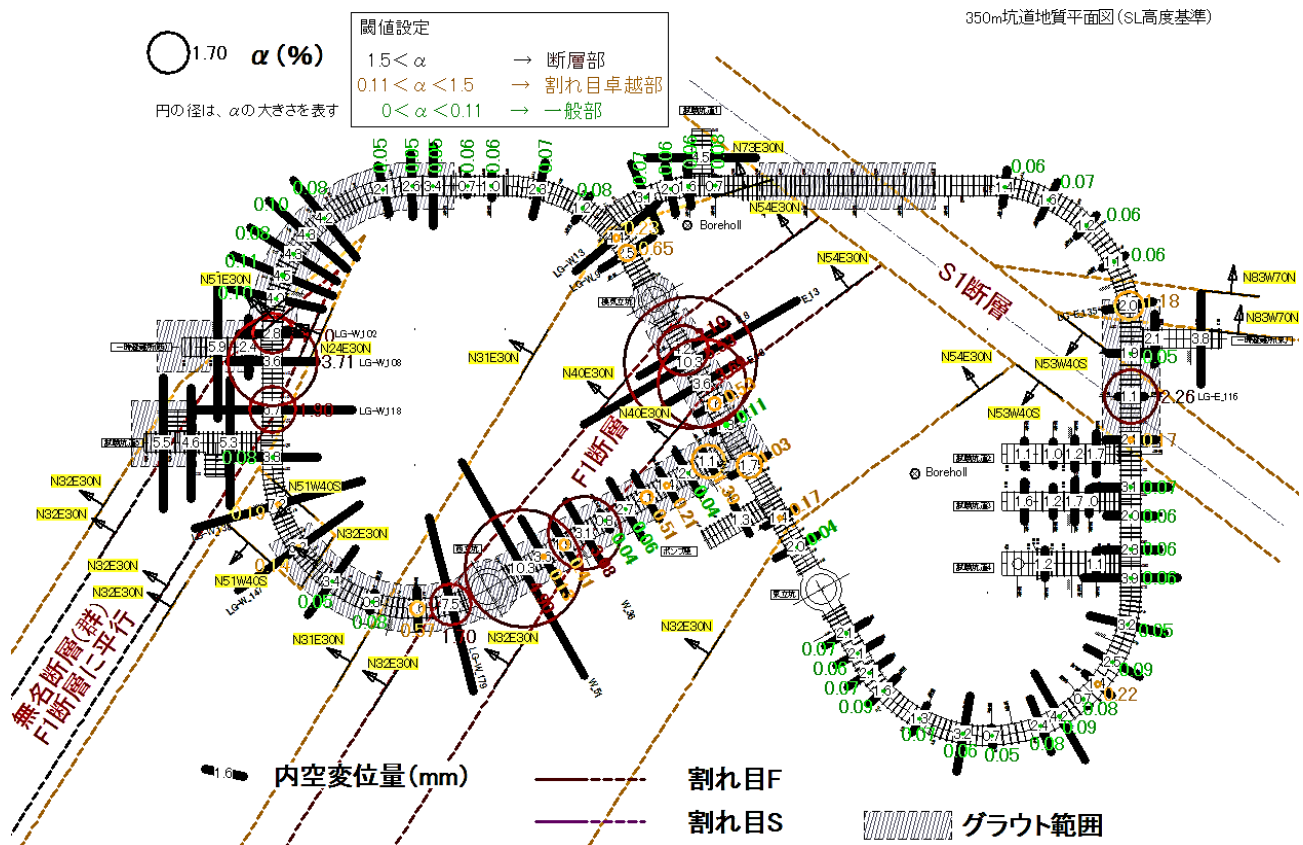


図-6 350m調査坑道における地質の不均質性の評価結果と内空変位計測結果

断層部，表-1に示すS，TS，STが卓越している一般部と断層部の間の区間で， $0.11 < \alpha < 1.5$ の不連続面卓越部，顕著な不連続面が認められない， $\alpha < 0.11$ の一般部の3種類に分類した。

図-6に示す内空変位と α の分布状況と分類した地質に基づいて平面図上で地質区分境界を設定し，観察された断層等の走向・傾斜から，断層部等の三次元構造を設定し，図-7に示す解析モデルを作成した。

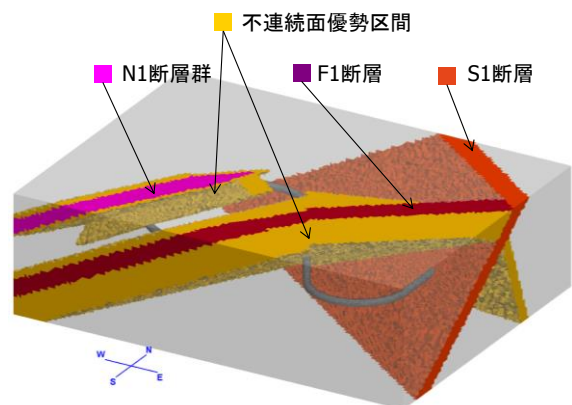


図-7 3次元逆解析用モデル

4. 3次元FDMによる初期地圧の推定

図-2に示した弾性挙動と見なせる内空変位増分と図-7の不均質性を考慮した解析モデルを用いて，3次元弾性FDM解析により逆解析を行い初期地圧比を推定した⁴⁾。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における坑道支保の設計用岩盤物性値⁹⁾を参照し，表-2のように設定した。なお，FDM解析による初期地圧比の推定手法に関しては，既報²³⁾⁴⁾を参照されたい。

解析の結果，表-3に示す鉛直圧を1.0とした場合の水平面内の初期応力比と方向が得られた。表には，設計時に仮定した条件と均質モデルによる解析結果も併せて示した。解析より得られた水平面内の初期応力比は，設計

表-2 解析用岩盤物性値

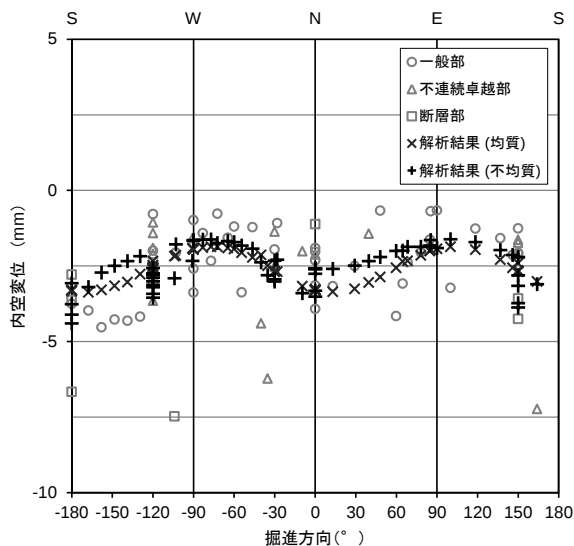
	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
一般部	2,000	0.186
割れ目卓越部	1,350	0.186
断層部	700	0.186

表-3 初期応力比

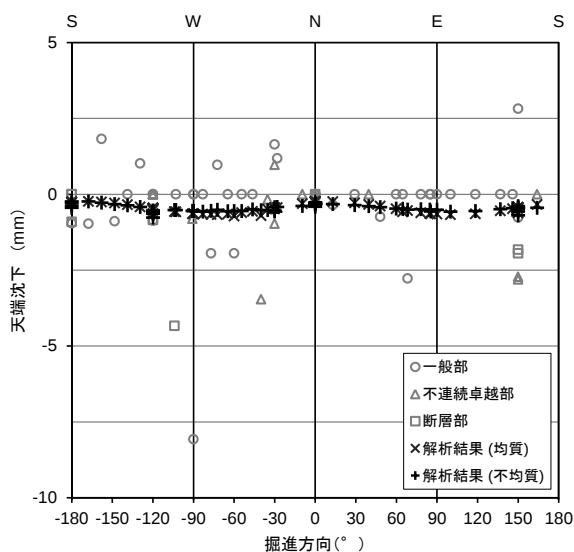
	鉛直応力	水平応力		
	σ_v	σ_{Hmax}	σ_{Hmin}	方向
設計	1	1.3	0.9	EW
均質モデル	1	1.48	1.04	N77W
不均質モデル	1	1.54	1.13	N81W

時の仮定よりいずれも大きい結果であった。また、最大水平応力の方向も、設計時の推定結果である東西方向よりも約 10° 程度西側に傾く結果であった。

推定された初期応力比を用いて計算される解析内空変位と分析対象計測変位の関係を図-8に示す。図-8に示すように、断層や既存割れ目等の不連続面の卓越部といった地質の不均質性を考慮することによって内空変位のばらつきをある程度評価できた。しかし、計測値のばらつきを評価できていない箇所が残されている。これを評価するためには、より詳細に地質の不均質性を評価し、地質の分類を細かくするとともに、断層部や不連続性卓越部の物性値についても室内試験等により詳細に評価する必要がある。さらに、コンバージェンスメジャーやレベル測量による内空変位計測の精度向上も重要な課題である。



(a) 水平内空変位



(b) 天端沈下

図-8 解析結果と計測結果の関係

5. 考察とまとめ

図-9は、地上からのボーリング調査や調査坑道で実施した水圧破碎法による初期地圧と解析によって推定された初期地圧を示したものである。凡例中のHDBは地上からのボーリング調査結果、調査坑は調査坑道での測定結果、図中実線は、深度0-250mの声間層の単位体積重量を 15kN/m^3 、それ以深の稚内層の単位体積重量を 17kN/m^3 と仮定して求めた土被り圧である。

地上からのボーリング調査結果では、土被り圧に対する水平面内最大主応力の比は $1.0\sim 2.0$ の範囲に、水平面内最小主応力の比は $0.8\sim 1.4$ の範囲に分布している。解析結果はこの範囲に内包されることから、広範囲の岩盤の初期地圧推定結果として今後の検討に用いることが出来るものである。ただし、調査坑道内で実施した初期地圧計測の結果には、解析結果は整合していない。

調査坑道における初期地圧計測結果は、地上からのボーリング調査結果と比較すると小さい値となっている。これは、坑道周辺の間隙水圧が掘削により減少したことに起因すると思われ、一概に本解析結果と比較することはできない。今後、精度の高い初期応力状態の推定にあたっては、調査坑道掘削時の水圧低下の影響も含めた議論も重要である。

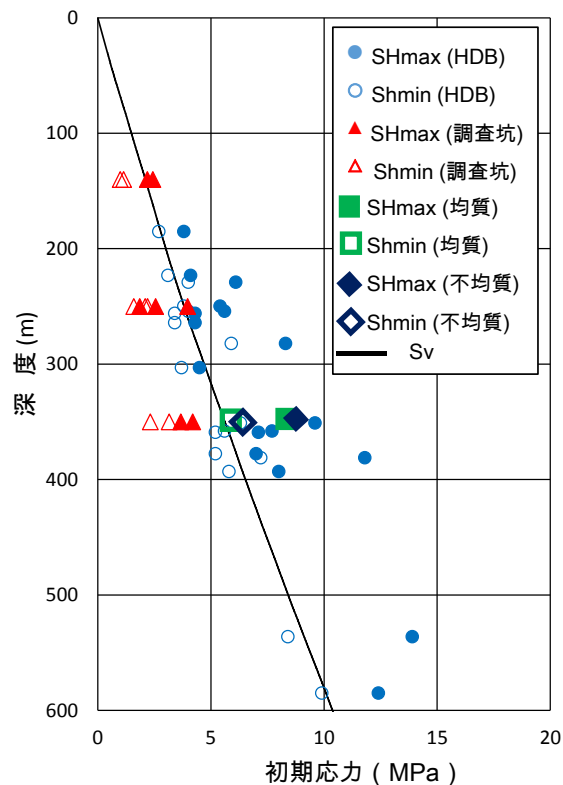


図-9 初期地圧計測結果と逆解析結果

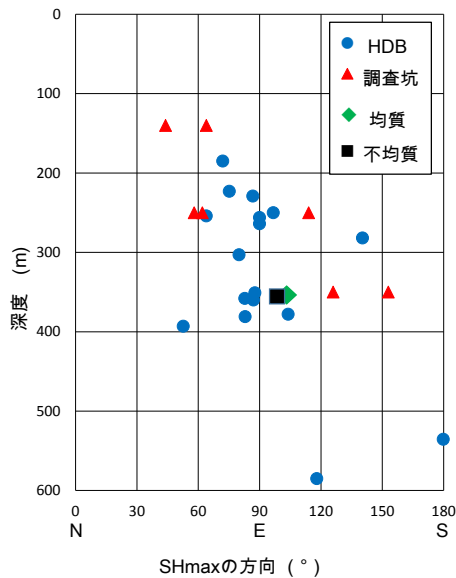


図-10 初期地圧計測結果と逆解析による主応力方向

図-10には、既存の初期地圧計測で得られた水平面内最大主応力の方向を解析結果と比較した。水平面内の初期応力の主方向は大きくばらついているものの、東西方向という設計時の設定に概ね整合する結果であった。トンネルなどの地下構造物の計画においてその主軸方向は、構造的安定性を得るのに有利な方向、すなわち最大主応力方向に一致させるのが一般的であり、広域岩盤の主応力方向に対応する逆解析結果は、坑道掘削方向を決定するうえで有用な情報になり得る。

以上に示すように、本研究では、周回坑道で計測された内空変位と詳細な地質観察結果に基づき、地質状況の不均質性を考慮した逆解析により広域岩盤の初期地圧状態を推定した。結果はこれまでの初期地圧計測結果と調和的であり、ここで提案する手法の有効性が確認できた。

今後は、逆解析により得られた初期地圧の情報に基づいて実施する設計解析（順解析）の手法について検討し、重要地下構造物の設計法の確立を目指す。

謝辞：本論文における坑道掘削時の詳細な地質調査とその評価は、地層科学研究所の松原誠氏の協力なくしては成しえませんでした。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 花室孝弘編：幌延深地層研究計画 平成27年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2016-022, 2016.
- 2) 亀村勝美, 藤田朝雄, 青柳和平, 名合牧人, 平瀬光泰, 菅原健太郎：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, 第44回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, pp.109-114, 2016.
- 3) Aoyagi, K., Nago, M., Kamemura, K. and Sugawara, K.: Estimation of Rock Mass Stress State Based on Convergence Measurement during Gallery Excavation, 9th Asian Rock Mechanics Symposium, Bali, Indonesia, 2016.
- 4) 亀村勝美, 青柳和平, 名合牧人, 菅原健太郎, 松原誠：坑道掘削時内空変位に基づく広域岩盤の初期応力評価, 第14回岩の力学国内シンポジウム, 岩の力学連合会, 2017.
- 5) 地層処分研究開発部門幌延深地層研究ユニット：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.
- 6) Aoyagi, K. 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, pp.331-338, 2013.
- 7) 青柳和平, 川手訓：幌延深地層研究計画平成25年度地下施設計測データ集, JAEA-Data/Code 2015-017, 2015.
- 8) 三谷和裕, 田中淳一, 野中英, 湯浅昇：エコーチップ試験機を用いたコンクリートの強度推定方法に関する検討, 日本大学生産工学部第47回学術講演会, pp.635-638, 2014.
- 9) 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, 2008.

DEVELOPMENT OF IN SITU STRESS ESTIMATION METHOD BASED ON THE MEASURED CONVERGENCE AND GEOLOGICAL OBSERVATIONS

Katsumi KAMEMURA, Kazuhei AOYAGI, Makito NAGO
and Kentarou SUGAWARA

In situ stress state is very important for the design of deep underground facility such as high-level radioactive waste disposal repository. This study establishes a practical and effective method for estimating in situ stress state based on the measured convergence and detailed geological observations during gallery excavation. The convergence was measured in various directions of the loop gallery at 350m depth of the Horonobe URL; this allows determination of the stress state corresponding to the rock mass behavior in 120 m × 200 m area. In situ stress state estimated by the back analysis considering existing faults and fractures showed a good agreement with that of estimated from hydraulic fracturing method.