

岩盤構造物の性能評価における課題 ー岩盤原位置応力の推定とその適用についてー

亀村勝美

深田地質研究所

Some Issues on the Performance Evaluation of Tunnel and Underground Cavern - Estimation of In-situ Stress and its Application -

KAMEMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨：岩盤構造物の性能評価に当たっては、対象とする構造物を含む岩盤の力学特性とともに原位置応力を適切に評価することが重要である。しかし岩盤の原位置応力は、重力（自重）だけでなくプレートテクトニクスに起因する造構力や地殻変動、地形や断層などの影響を受けており、しかも代表的な岩盤応力測定法である応力解放法や水圧破碎法によって得られる結果もばらつくことが多く、大規模な岩盤構造物に対応する原位置応力の評価は難しい。ここでは2017年の年報で示した周回坑道掘削時の計測変位の逆解析による原位置応力推定法をこれまでの原位置応力推定法の中でどう位置づけ、どう活用するのかについて議論する。

キーワード：原位置応力、岩盤応力測定、ISRM 指針、高レベル放射性廃棄物処分施設

Abstract: In the performance evaluation of deep and large scaled underground structures such as high-level radioactive waste disposal depositories, estimates of in-situ stress is very important as well as the mechanical characteristics of rock mass. In-situ stress measurements such as hydraulic fracturing method, stress relief method and AE (acoustic emission) method, are often conducted to provide estimates of in-situ stress. However, it is reported that measurement results by these methods differ from each other because of heterogeneity of rock mass. This will cause in-situ stress evaluation difficult. Here, how to apply new in-situ stress estimation method (see 2017' annual report) based on the inverse analysis of measured displacement during circuit tunnel excavation into the conventional in-situ stress estimation process is discussed.

Keywords: in-situ stress, rock stress measurement, ISRM Suggested Method, Radioactive waste depository

1. はじめに

石油やLPGなどのエネルギーの大規模地下貯蔵施設や高レベル放射性廃棄物の処分施設など、岩盤の持つ密閉性や長期安定性などの特性を活かした構造物が建設、あるいは計画されている。このような岩盤構造物の安全は、この先の長い供用期間

中、どう保たれていくのか？など岩盤構造物の性能（安全）評価は、重要である。

岩盤構造物の性能評価を行うためには、これらの構造物が施工時にどのような挙動をし、それに対して岩盤や支保工の安定性がどう変化したのか？それらは設計時に想定した通りなのか？そして完成時に岩盤と支保工がどのような状態にあり、

それは構造物の供用中にどのように変化するのか？などを具体的に評価する必要がある。

亀村 (2017)は、山岳トンネルや地下発電所大空洞などの岩盤構造物の設計の現状を紹介した上で、設計において力学的特性と同様に重要な原位置応力の推定における課題を示すとともに、広域岩盤の原位置応力の新たな推定法について紹介した。

そこでの議論の概要は以下の通りである。

- ・原位置応力はプレートテクトニクスなどの造構運動、重力、地質構造などの影響を受けているが、各々の定量的評価は難しい。
- ・岩盤応力の計測法として様々な原理に基づく多くの手法が提案されているが、まだ多くの課題が指摘されており、手法の適用性、妥当性などが確認され基準等として確立されたものは少ない。
- ・一般に岩盤応力測定の対象とする岩盤の領域は小さく、岩盤マスとしての原位置応力評価を行う場合、複数の地点で複数の手法により計測を行うものの、その結果はばらつく。しかしそれらの計測結果の評価法は確立されていない。

そしてこうした原位置応力評価に関わる課題の一つの答えとして周回坑道掘削時に計測された岩盤変位を逆解析することによって周回坑道を含む広域岩盤の原位置応力を推定する方法を示した。

ここでは、岩盤構造物の設計において岩盤応力測定がどのように用いられているのか、あるいは用いられるべきなのかについて岩の力学国際学会 (International Society of Rock Mechanics and Rock Engineering : ISRM)の指針 (Suggested Method)を参照しながら考えていきたい。

2. 山岳トンネルの情報化施工における初期応力

山岳工法（岩盤などの硬い地山で、掘削後ある程度の時間掘削面が自立することを前提とした工法）トンネルの標準工法である NATM（New Austrian Tunneling Method, ナトム工法）は、掘削後の地山を支える支保材料として主に吹付コンクリートとロックボルトを用いるところに特徴がある他、その施工方法にも特徴がある。すなわち、まず事前の地質調査結果に基づき地山評価が行われ、その評価結果に基づいて示方書や基準などに規定された地山分類に対応する支保工、掘削法が設定され施工が行われる。そして掘削中は、切羽で得られる地質情報やトンネルの内空変位などの計測データを適宜評価し、より地山条件に適合した支保工や掘削工法に順次変更していく「情報化施工」が行われている。

この情報化施工の基本は、図1に示すような品質管理のためのPDCAのサイクルにある。PDCAサイクルは、生産技術における品質管理などの継続的改善手法として確立されたものでPlan(計画)→Do(実行)→Check(評価)→Act(改善)の4段階を繰り返すことによって業務を継続的に改善する。トンネルでは施工の進展とともに変化する施工条件に対応し構造の安定性を確保していく。

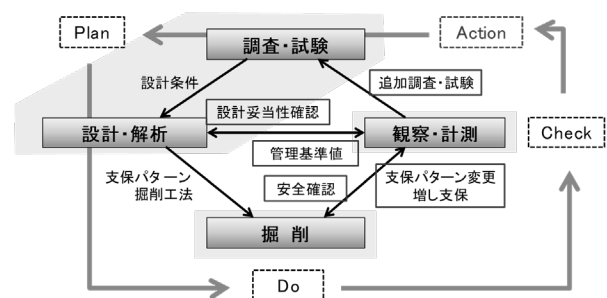
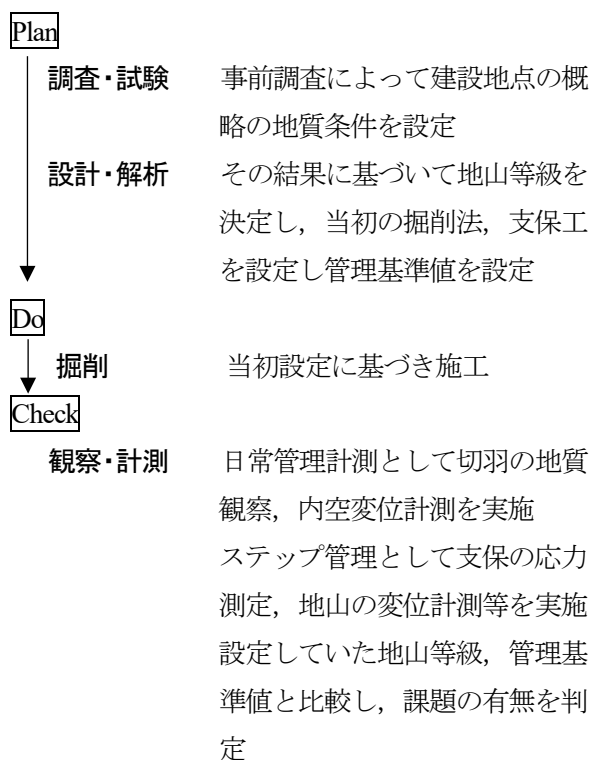


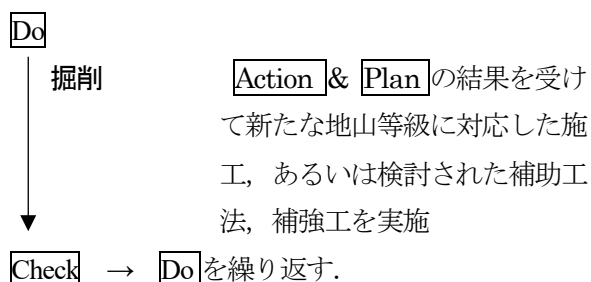
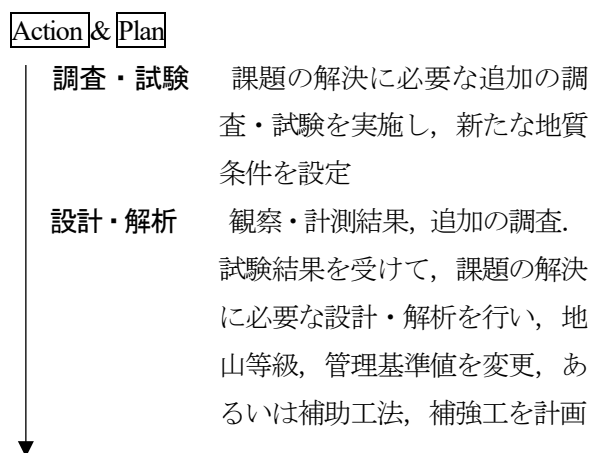
図1 情報化施工の概念

具体的には、以下のようにして施工が進められる。



と進み、地山条件が想定通りであり、支保工も問題ない場合、**Do**と**Check**を繰り返す。

一方、想定した条件と異なる地山に遭遇する、あるいは支保や地山が変状するなどの課題が生じた場合には、以下の**Action**を実施する。



一般の山岳トンネルではこのようなサイクルを繰り返し、掘削で明らかになった地山条件に適合するトンネル構造を構築する。ここで留意しなければならないことは、このサイクルの中の**Plan**：調査・試験と設計・解析において地山の力学特性（変形、強度特性）は詳細に検討されるものの、もう一つの重要な因子である原位置応力については、詳細な検討が行われることが少ないことである。それは、トンネルは線状構造物であり、切羽ごとの安定性が確認されれば、トンネル全体としての安定性は保たれるとされているためと考えられる。すなわち特異な地質や変状に遭遇しない限りトンネルが建設される地山全体の初期応力状態を把握するために多大な労力と時間を要する岩盤応力測定を行うことは稀であり、トンネル切羽ごとの地山と支保の力学特性の評価を主として行うためである。

しかもトンネルの施工中に実施された情報化施工に関わる多くの知見（調査結果に基づき評価された地山等級の実際に施工された地山との一致度、補助工法や補強工の効果など）は、そのトンネル限りのこととされ、情報化施工管理手法の適合性、さらにはトンネル施工の合理性、安全性の向上のための議論へと発展させることは行われてこなかった。

しかし、現在様々な研究開発が進められている高レベル放射性廃棄物処分場のように、岩盤の持つ長期安定性、密閉性などの特性を前提にした高

い安全性を求められる岩盤構造物においては、その特性を支配する要因の一つである岩盤原位置応力の推定は非常に重要であり、その評価に当たっては、これまでの山岳トンネル等において実施されてきたもの以上の対応が求められる。

3. 初期応力推定法の現状と課題

大深度地下に構築される重要構造物の計画、設計に当たっては、対象とするサイトの原位置応力を如何に推定するかが重要である。特に長期にわたる高い安全性を求められる高レベル放射性廃棄物処分場の計画、調査、設計、建設の各過程においては、それぞれの過程での実施内容の妥当性を評価し最終的な施設の健全性を確保する必要がある。建設サイトの広域かつ大深度岩盤の原位置応力状態の評価は、非常に重要な課題である。それは放射線に対する天然のバリアとして期待されている岩盤の様々な特性を支配している因子の一つが原位置応力であるからである。

しかしながら、工学分野における原位置応力の推定については、鉱山等を除くと大深度、大規模構造物の建設事例が少ないこと、岩盤応力測定に多くの費用と時間を要することなどから実施事例は限られており、これまでに得られた知見は少ない。また岩盤応力測定法の研究開発が進められ、その成果が各種の基準や指針としてまとめられつつあるものの、未だ多くの課題が残されていることも指摘されている。さらに特定の建設サイトを対象とした原位置応力の推定法に関する議論は、それを必要とするプロジェクトに限られており、活発に行われているとは言いがたい。以下ではこのような原位置応力の推定を困難にしている問題について現状と課題を示す。

表1は、横山（2017）によって示された主な初

期応力測定法とその特徴である。様々な原理に基づく多くの手法が提案されており、特徴も様々である。では、これらの手法によれば確実に原位置応力が求められるかという点、必ずしもそうではない。横山はこれらの手法の内、これまでに基準や指針として公表されている初期応力測定法として表2を示している。このように計測結果の評価に用いる理論に残された課題が少なく、比較的安定した計測結果が得られるものとして基準化あるいは指針化されているのは、岩盤の破碎と応力解放に原理を置く手法のいくつかに限られており、しかも機関ごとに公表された試験法が異なっているのが現状である。

一方、まだ基準化に至っていない孔壁やコアの自然破壊に基づく方法や、採取されたコアを用いる方法については、原理的には適用性は確認されているものの、評価における仮定条件の妥当性、その影響などに未だ解決すべき問題が残されており、一般化には時間を要すると考えられる。

では、これらの初期応力測定法によってどのくらいの領域の原位置応力が推定されるのであろうか。表3はZangとStephansonn（2010）による主な初期応力測定法と対象とする岩盤の体積を示したものである。体積とは、各測定法によって得られる応力が代表する領域を示している。したがってこの体積より広い領域の平均的な原位置応力を評価するためには、複数の地点で複数の手法で測定を行い、得られた結果（当然ばらついている）を何らかの方法で評価し、検討対象とする岩盤領域の平均値とする必要がある。

表を見ると代表的な初期応力測定法である応力解放法の推定体積は $0.001\sim 0.01\text{m}^3$ 程度、水圧破碎法でも $0.5\sim 50\text{m}^3$ 程度である。したがって例えば高さ $30\text{m}\times$ 幅 $20\text{m}\times$ 長さ 150m の地下発電所空洞を評価対象とすると、空洞掘削の影響領域を含め

表1 主な初期応力測定法とその特徴（横山 2017 の表 1 に加筆）

原則	手法		特徴	
岩盤の破砕 Borehole fracturing	水圧破砕法 Hydraulic fracturing	孔内での人工き裂の生成による 深度1000m 以上でも測定可能 国内外で実績多	圧力を作用させる媒体の違い	
	スリーブ破砕法 Sleeve fracturing	孔内での人工き裂の生成による 深度1000m 以上でも測定可能	弾性係数を必要としない	
	乾式破砕法 Borehole-jack fracturing	孔内での人工き裂の生成による 深度1000m 以上でも測定可能 国内で開発中	2D平面応力（HTPFでは3D応力） 既存亀裂の影響を受ける	
応力解放 Stress relief by overcoring	孔底ひずみ法 Compact conical-ended borehole overcoring	孔内での応力解放，小口径(φ76mm) 国内外で実績多，日本オリジナル 鉛直下向きを開発中	ひずみや変位の計測位置の違い	孔底面にゲージを貼付 多くの計測値からの推定値で精度が高い
	埋設ひずみ法 Multi-axial strain gauge	孔内での応力解放，大口径(φ222mm) 国内で実績多 日本オリジナル	等方均質の弾性体と仮定	軟岩から硬岩まで対応可 回収コアによるキャリブレーション
	孔壁ひずみ法 Borehole wall strain	孔内での応力解放，中口径(φ116mm) 海外で実績多 鉛直下向き測定可	割れ目や不均質性などによる非弾性挙動の影響を受ける	孔壁面にゲージを貼付 CSIRO HI Cellでは改良された3D応力
	孔径変化法 Borehole deformation	孔内での応力解放，中口径(φ116mm) 海外で実績多 鉛直下向き測定可	ボアホール口元から50m程度の深度が限界	2D応力 3Dの孔径変化対応も
孔壁やコアの自然破壊 Borehole / cores breaking	ボアホールブレイクアウト Borehole breakout	孔壁に発生する圧縮破壊を利用 大きな側圧比の条件下で発生	ボアホールやコアに発生する破壊現象の観察 大きな応力差条件下の均質な硬岩	
	ドリリングインデュースドフラクチャリング Drilling induced fracturing	孔壁に発生する引張り破壊を利用 深度1000m 以上でより有効		
	コアディスクング Core diskling	コアの板状自然破壊を利用 大きな側圧比の条件下で発生		
岩石コアの利用 Core-based	AE 法 Acoustic emission	岩石のカイザー効果を利用 国内で実績多，日本オリジナル	作業が簡単であり、定方位資料が採取できれば適用深度に限りはない	独立した6個以上の供試体により3D応力
	変形率変化法 Deformation rate analysis	岩石の非線形ひずみ挙動を利用 日本オリジナル		独立した6個以上の供試体により3D応力
	DSCA 法 Differential strain curve analysis	封圧下での岩石のマイクロクラックとひずみの関係を利用 国内外で実績多		鉛直成分を土被り圧とすることで3D応力
	ASR 法 Anelastic strain recovery	応力解放直後における岩石の非弾性変形挙動を利用		
	コア変形法 Core deformation method	採取されたコアの断面形状から推定	掘削される瞬間のコアが真円と仮定	

表2 基準化あるいは指針化されている初期応力測定法

原則	手法	ASTM	BS	ISRM	JGS
岩盤の破砕	水圧破砕	○	○	○	
応力解放	孔底ひずみ法			○	○
	埋設ひずみ法				○
	孔壁ひずみ法		○	○	
	孔径変化法	○		○	

ASTM: American Society for Testing and Materials International

BS: British Standard

ISRM: International Society of Rock Mechanics

JGS: The Japanese Geotechnical Society (地盤工学会)

表 3 地殻応力測定における岩盤体積

(出典 : Arno Zang and Ove Stephansson, Stress Field of the Earth's Crust,
Springer, 2010 に示された Table7.2 の一部)

岩盤体積 (m ³)	手法	逆解析手法	解析 次元	推定体積
1.E+10	FPS	Focal Plane Solutions 断層面解析	2D	平面10×100km×10m厚
1.E+09	FSS	Fault Slip Striations 断層のすべり痕	1D	平面上の直線
1.E+07	MEX	Mining Excavation 採掘	3D	
1.E+06	FIS	Fluid Induced Seismicity 液体注入に起因する地震	2D	2本のボーリング間の先端圧力 深さ3km、離間100m、厚さ10m
1.E+05	IS	Induced Seismicity 誘発地震(4<M<6)	2D	断層面1×10km×10m厚
1.E+04	MIS	Mining Induced Seismicity 採掘起因の地震	2D	岩破碎(2<M<4) 断層面100×100m×1m厚
1.E+03	RLRV	Relief of Large Rock Volumes 大規模岩塊の解放	3D	
1.E+02	HF	Hydraulic Fracturing 水圧破碎	2D	0.5 – 50m ³
1.E+01	HTPF	Hydraulic Testing on Pre-Existing Fracture 既存破壊面水圧試験	3D	1 – 10m ³
1.E+00	SR	Surface Relief 地表でのボーリングによる応力解放	3D	1 – 2m ³
1.E-01	FJ	Flat Jack フラットジャッキ	3D	0.5 – 2m ³
1.E-02	BBO	Borehole Breakouts ボアホール ブレイクアウト	2D	0.01 – 100m ³
1.E-03	BR OC	Borehole Relief ボアホールの応力解放 Over coring オーバーコアリング	3D 2-3D	10-3 – 10-2m ³
1.E-04	ASR	Anelastic Strain Recovery 非弾性ひずみ回復		
1.E-05	DSA WVA KE	Differential Strain Analysis 差ひずみ解析 Wave Velocity Analysis 波速解析 Kaiser Effect カイザー効果	3D	
1.E-06	RS	Single grain residual stress 単粒子残留応力 Diffraction measurement 回折計測		

て原位置応力の評価対象体積は $4 \times 10^5 \text{m}^3$ 程度となり、地質条件にもよるがかなりの数量の測定が必要となる。また、十分な数量の測定が行われたとしても、測定結果のばらつきをどう評価するのか？単純に平均を求めることで性能評価対象領域の代表値としてよいのか？などの問題は残る。したがって表1に示した手法を補完するような新たな手法の開発は急務である。

一方、表1に示した各種の初期応力測定法によ

り得られる結果は多くの場合、異なることが報告されており、複数の手法による測定結果をどう評価するかは重要な研究課題である。国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA)は、前身の動力炉核燃料開発事業団の時代から長年にわたって初期応力測定についても様々な研究を行っており、多くの知見を得ている。佐藤ら(1998)が東濃鉱山(岐阜県土岐市)の軟岩と釜石鉱山(岩手県釜石市)の硬岩を対象として行った測定手法の

適応性の検討については亀村(2017)で紹介した。

このように初期応力測定として様々な手法が提案されているものの、それぞれに測定手法、測定結果の評価手法における課題を残しており、岩盤の不均質性、不連続面の影響等を過不足なく評価した上で原位置応力を評価できる方法は、未だ確立されてはいないのが現状と言える。

4. 特定のサイトにおける原位置応力の推定法

岩盤応力の推定方法について明確に示したものが少ない中で ISRM (International Society of Rock Mechanics and Rock Engineering: 岩の力学国際学会) は、以下の指針を公表している。

ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation
(以下 ISRM SM)

Part1: Strategy for rock stress estimation (Hudson et al. 2003)

Part2: overcoring methods (Sjöberg et al. 2003)

Part3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)
(Haimson and Cornet 2003)

Part4: Quality control of rock stress estimation
(Christiansson and Hudson 2003)

Part5: Establishing a Model for the In Situ Stress at a Given Site (Stephansson and Zong 2012)

ここでは Part1 と Part5 に基づいて、高レベル放射性廃棄物処分場の建設を念頭に置いた情報化施工における初期応力評価に関連して実施すべき検討の概要を示す。

一般に岩盤応力は、原位置応力（初期応力）と二次応力に分けることが出来る。そしてこれらの応力は、様々な要因により生じる応力の重ね合わ

せとして表すことが出来る。

原位置応力は、造構運動による造構応力、岩盤の自重による重力応力、そして過去の造構運動の結果として今も残っている残留応力（一部は自然の過程の中で解放されている）から構成されている。この内、自重は岩盤を構成する地層の力学特性（単位体積重量、変形特性、強度特性など）とその分布（地層構成、断層などの不連続性）、地形などの影響を受けており、基本的にはごく浅い地表付近を除いた地表面近くの地点の鉛直方向応力は、この自重によって決まるとされている。

一方、二次応力は、工学的な外乱により誘発されるもので、工学的な外乱としては、採鉱、掘削、穿孔、揚水、注入、エネルギー抽出など、またこれらに付随して生じる吸水膨張や圧密なども含まれる。

この他にも応力の定義がある。表 4 は ISRM SM Part1 に示された岩盤応力に関連した用語の説明である。また図 2 は、表 4 に示された応力の種類を概念的に示したものである。表に示した 1, 2, 9, 10, 11 は要因ごとの応力、3 はこれらの応力の重ね合せの結果として示される現在の応力である。8 は人為的に行われる工学的な外乱による応力である。そして要因ではなく、応力評価する対象領域の広さによって 4~7 の応力が定義されている。

このような応力を重ねあわせた結果としての現在の応力状態を設定する手順として ISRM SM Part5 では、表 5 のような概念を示し、その内容を解説している。その手順は、以下のように要約することができる。

表 4 用語の定義(ISRM SM Part1)

	応 力	説 明
1	Tectonic stress: 造構応力	プレートテクトニクスによる応力
2	Gravitational stress: 重力応力	土被りの岩盤自重による応力
3	Natural stress: 自然応力	工学的影響の作用前に存在する応力
4	Regional stress: 広域応力	比較的広い地質領域の応力
5	Far-field stress: ファーフィールド応力	ニアフィールド外側の応力
6	Local stress: 局地の応力	小さい領域の応力
7	Near-field stress: ニアフィールド応力	工学的外乱の及ぶ領域の応力
8	Induced stress: 誘発応力	工学的外乱による自然応力
9	Residual stress: 残留応力	過去の造構運動により発生し、現在も存在している応力
10	Thermal stress: 温度応力	温度変化による応力
11	Palaeostress : 古応力	現在は働いていない過去の自然応力

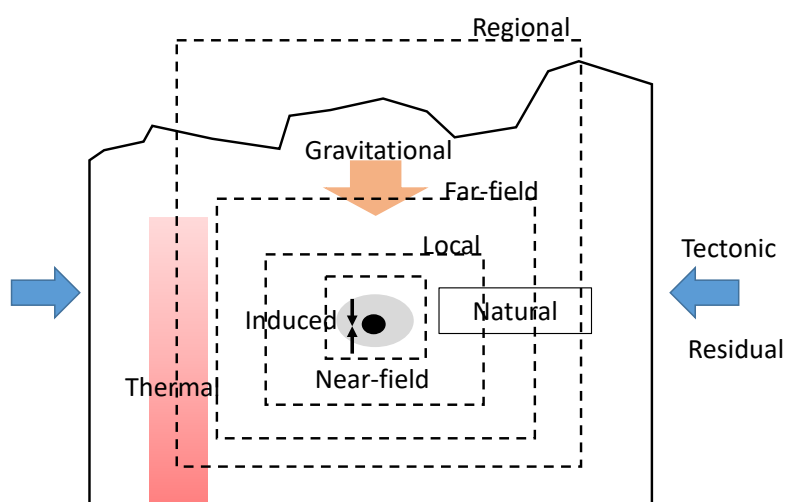


図2 様々な応力の定義

表5 最終岩盤応力モデルの作成(ISRM SM Part5)

最良推定モデル Best Estimation Stress Model		応力測定法 Stress Measurement Method		統合応力の決定 Integrated Stress Determination	最終岩盤応力モデル Final Rock Stress Model
データ抽出	応力の種類の推定 世界応力地図データ ベース	ボアホール法	水圧破碎 HTPF スリープ破碎 応力解放 ブレイクアウト	統合応力モデル ・水圧破碎 ・HTPF ・オーバーコアリング ・発振機構 ・断層すべり解析 ・その他	
形態学的 地質学的 データ	形態学 地形学 氷河作用 隆起・沈降	コア法	ASR DSA DSCA DWVA WVA DIF コアディスキング カイザー効果	数値モデル ・岩盤力学 ・パラメータ ・境界条件 ・幾何 ・解析ソフト(BEM, DEM, FEM, etc)	
	岩質 ・岩種 ・伸長 ・境界 ・異方性				
	応力分離		地震: FIS, MIS, RIS		
	地質構造 ・断層 ・脈 ・岩脈 ・破碎帯 ・節理				
ボアホールと コアのデータ	ボアホールのデータ ・安定性 ・ブレイクアウト ・断層すべり解析 ・岩質 ・地下水	対象領域の大きさ			
	コアのデータ ・コアディスキング ・断層すべり解析				
①既存データ		②新規データ		③統合されたデータ	④最終データ

HTPF:Hydraulic Test of Pre-existence Fracture(既存亀裂の水圧試験)

ASR: Anelastic strain recovery(非弾性ひずみ回復法)

DSA: Differential strain analysis(差ひずみ解析法)

DSCA: Differential strain curve analysis(差ひずみ曲線解析法)

DWVA: Differential wave velocity analysis(波速傾斜解析)

WVA: Wave velocity analysis(波速解析)

DIF: Drilling induced fracture(掘削時に生じる引張亀裂を評価)

FIS: fluid-induced seismicity(注水に起因する地震)

MIS: mining-induced seismicity(採掘に起因する地震)

RIS: reservoir-induced seismicity(貯水池に起因する地震)

BEM: Boundaru element method(境界要素法)

DEM: Distinct element method(個別要素法)

FEM: Finite element method(有限要素法)

最良推定モデル (Best Estimation Stress Model) の作成から応力測定 (Stress Measurement Method) へ

まず既存の応力に関するデータベースや形態学、地形学、地質学からの情報、そしてすでに実施されているボーリングからの情報などを収集、分析し、原位置応力推定作業の出発点となる最良推定モデルを作成する。次にこれに基づいて、新規データ取得のための適切な初期応力測定法を選択し、測定計画を立案する。原位置での応力測定の前の最良推定モデルの作成は必須である。

応力測定から統合応力の決定 (Integrated Stress Determination)

最良推定モデルに基づいて計画した手法により初期応力測定を実施した後、最良推定モデルからの情報および様々な初期応力測定結果に加えて、異なる手法（震源機構、断層すべり解析、ボアホールブレイクアウト）による応力推定と、数値モデルによる検討を併せて行い、これらすべてを統合した応力を決定する。ここにおいて数値応力モデルは、初期応力の予測と検証に有用であり、最終的な岩盤応力モデル (Final Rock Stress Model) の確立に資するものである。

この表には原位置応力の推定対象とする領域の大きさの概念も示されている。対象とする領域の大きさは、推定作業に利用できるデータがどう分布しているのかによって決定される。最良推定モデルは、すべてのデータが同一と見なせる連続体から抽出されていると仮定できるのか、またはデータを部分集合に分割する必要があるのかを判定するのに役立つ。この判断を行った上で統合応力の決定を行う必要がある。

これらの一連の検討により、従来の単一の方法によるアプローチとは、精度と信頼性において格

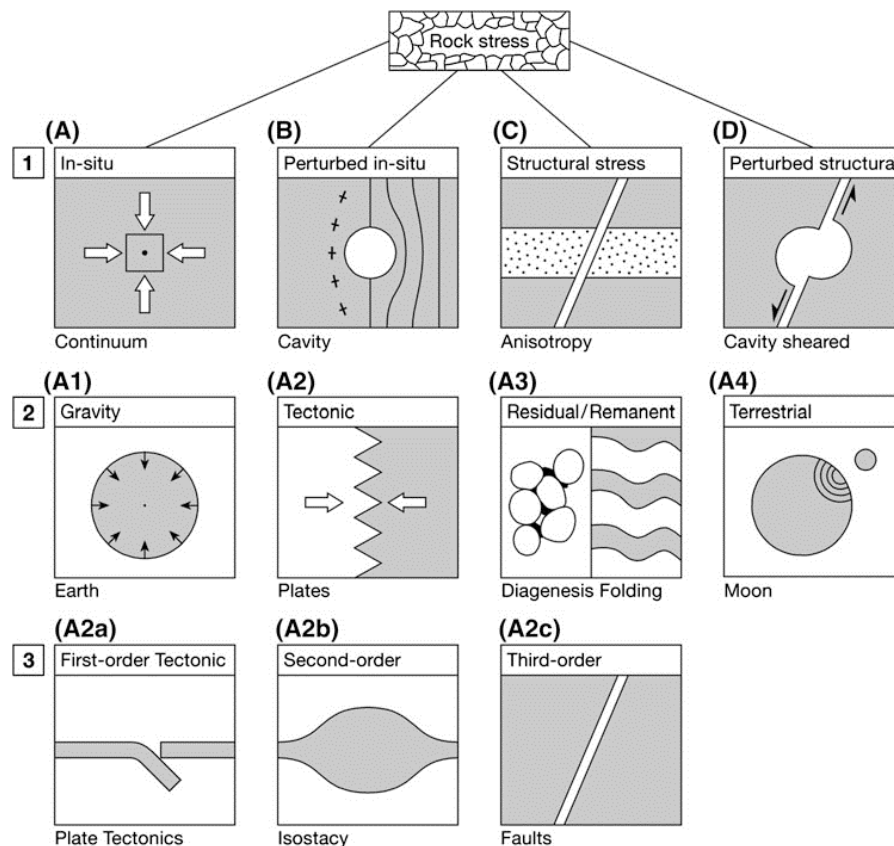
段に異なる原位置応力を得ることが出来る。空間も時間も異なる複数地点に対する単一の手法による計測結果に基づいて解釈されていたサイトは、統合応力の決定を通して初めて一つの解として評価される。しかしこれは、様々な方法、様々なスケールを統合するという難しい課題である。

ボアホールおよびコアから得られる地質学的な原位置データは、古いものであれ新規に実施したものであれ多くの場合、点の情報でしかない。しかし、統合応力の決定で実施される初期応力測定結果の統合と応力モデルによる検討を通して得られる最終的な岩盤応力モデルは、より大きな岩盤体積に関連するものであり、サイトでの地下構造物の設計や建設により適したものである。

最良推定モデルを作成するためには、サイトまたはその領域に存在する可能性のある応力の種類を評価する必要がある。しかし地殻に存在するさまざまな種類の応力に関する国際的に合意された用語や評価手法はない。この点について ISRM SM Part5 では図 3 の岩盤応力の分類と用語を示している。

まず第 1 段階では、原位置応力 (A) と外乱による原位置応力 (B)、異方的あるいは不均質な岩盤に起因する構造的応力 (C) そして外乱を受けた構造応力 (D) を区別する。不均質な領域からの距離に応じて、ニアフィールド応力（不均質領域付近の乱された局所応力）と、ファーフィールド応力（乱された領域から十分に離れた領域に作用している応力）を区別する。ニアフィールド応力は、断層や不均質などからの距離と共に急速に減少する。応力テンソルから種類の異なる成分（例えば、断層によって局所的に乱された領域の水平応力）を分離するためには、大きさの異なる領域を対象とした検討を行う必要がある。

第 2 段階では、原位置応力 (A) に影響を与え



レベル1では、掘削された岩盤(B, D)と固体(AC)を分類する。

レベル2では、応力もとの原因により分類する

レベル3では、造構応力を対応する領域（プレートテクトニクス、
アイソスタシー、断層）で分類する

図3 岩盤応力の構成と3レベルの定義 (ISRM SM Part5)

る地殻内の4つの異なる応力（重力による応力、造構運動による応力、残留応力、地球規模の応力）について検討する。そして第3段階では、地殻に作用している現在の造構応力(A2)が、1次応力（プレートテクトニクスによるもの：A2a）、2次応力（アイソスタシーによるもの：A2b）、3次応力（断層によるもの：A2c）に分類される。この造構応力の順序の違いは、応力成分が大きさ、方向ともに均一であると想定される領域において比較、検討される。

この1次および2次の応力に関連する様々なスケールと局所的に作用している力は、最新のプレートテクトニクスで議論されている。また、3次応力は、断層、大地震に起因する地震誘発応力変化および火山噴火、ならびに局所的な密度差によって説明することが出来る。応用岩盤力学と岩盤工学に関連する検討のためには、重力(A1)および造構応力(A2)が非常に重要である。

アマデイら(2012)は「一般に、岩盤の原位置応力を推定する過程においては、その場所に特有

な多くの判断を必要とする。その際には、解析または数値モデルを用いてパラメトリックな検討を行うことで様々な現象の相対的重要性を評価することが出来る。さらに、以前の結果にその後の新たな応力測定結果を加えることによって予測を修正することが出来る。」と述べている。

このような観点から、新たに提案した「内空変位計測に基づく初期応力推定法」を表5の最終岩盤応力モデルの作成のプロセスの中に落とし込んでみる。すると開発した手法は、初期応力測定法の新たな一項目としてこれまでにないデータを提供することになる。また、提案した手法では原位置応力の推定過程で数値モデルを用いるため、そこでの知見は「総合応力の決定」における応力モデルと数値モデルに反映させることが出来、よりスムーズに最終岩盤応力モデルを設定することが可能となると考えられる。

5. 変位計測に基づく原位置応力推定法を組込んだ情報化施工

山岳トンネルでは、線状構造物であることから事前に全線にわたる地質を調査することは多くの時間と労力を必要とするため、設計に当たって行われる地質調査は両坑口付近とトンネル路線上の地表踏査が主であり、地表からの物理探査やボーリング行われるのは事前に地質条件に問題が想定される場合に限られる。また、トンネル掘削中に困難な地質条件が想定される、あるいは想定外の地質条件に遭遇した場合には、一旦、切羽での掘削作業を中断し水平ボーリング調査を実施し切羽前方の地質確認が行われる。そして、得られた地質情報と掘削切羽面ごとの地質観察、トンネル内空変位などの計測に基づいてトンネルの力学的安定性を評価し、必要な対策を講じた上で掘削を継

続する。ただし、先にも述べたように掘削した地山の安定性確認が主となるため、原位置応力の評価が行われることは稀である。

次に石油や LNG などのエネルギー貯蔵用大規模地下空洞では掘削時の岩盤の力学的安定性評価に加えて、内容物の漏洩を防ぐため岩盤の液密性、気密性が設計条件通り保たれているかが評価上の大きな課題である。したがって、事前調査として地表から建設地点の物理探査、ボーリングが複数行われるほか、地下空洞深度に至る作業用トンネルとして掘削される斜坑の途中に調査用坑道を設け、そこからさらに詳細な地質調査のためのボーリングや原位置岩盤試験、初期応力測定が行われることが多い。この場合の初期応力の推定対象は、 $1\sim 2\times 10^6\text{m}^3$ である。

一方、高レベル放射性廃棄物処分施設では、例えば地下数百 m の深度で 2km^2 の範囲に処分坑道を配置する場合 (図6参照)、処分用トンネルの径=5m、処分孔の深さ=5m に対し掘削影響範囲高さ=15m とすると、掘削による岩盤への影響を検討すべき領域は $15\times 2\times 10^6=30\times 10^6\text{m}^3$ となる。しかも、この掘削影響の評価は力学的安定性については勿論のこと、それ以上に掘削の影響を受けた岩盤の水理的、熱的、化学的特性について評価を精度良く行う必要があり、評価対象に対しどのような調査を行い、どのような評価を行うのかは非常に重要な問題である。

そしてそのような評価の前提条件となるのが、亀村 (2017) で示した逆解析による初期応力推定手法によって得られる広域岩盤における信頼できる初期応力情報である。この逆解析の対象領域は、図4に示すように $256\text{m}\times 191\text{m}\times 76\text{m}(=3.7\times 10^6\text{m}^3)$ であり、この領域を岩盤体積と考えると表3に示した大規模岩塊の解放による初期応力推定法 (10^3m^3) の対象岩盤体積よりも広域の岩盤を対象

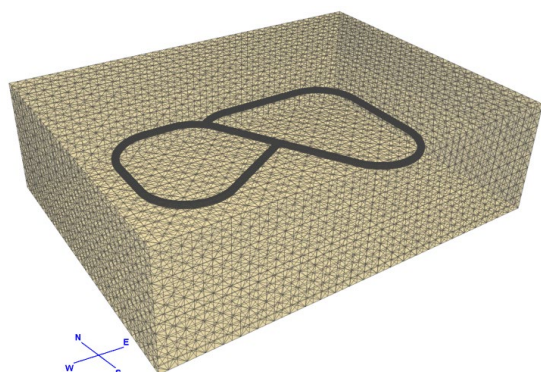


図4 逆解析による初期応力推定の解析モデル

としたものであり、ボーリング孔やボーリングコアを用いた手法によるもの（ $\sim 10^2 \text{m}^3$ ）と地質学的手法によるもの（ $10^9 \sim 10^{10} \text{m}^3$ ）との間に位置づけられる。

この手法を高レベル放射性廃棄物処分施設独特の建設工程の中で活用し、最終的に建設される処分坑道の配置、方向、支保パターンを選定などを行い、坑道掘削時の安全性だけでなく工期、工費の最適化を図る。その上で建設された施設の超長期の安定性を確保するのである。

次に高レベル放射性廃棄物処分施設の施工フローの特徴とは何かについて、山岳トンネル、地下空洞そして処分施設の概略建設フローと情報化施工の関係を示し、議論する。

図5に示すように、鉄道や道路におけるトンネルの建設では、計画された路線全体の線形と地形からトンネルの位置や深度がほとんど自動的に決定され、それらの条件の選定の余地は少ない。そして文献調査、地表踏査、必要に応じて弾性波探査、地表からのボーリング調査などが行われ、トンネル縦断面における地質状況が推定される。この調査結果に基づいて、既に基準や標準として規定されている地山分類表に基づいて地山分類が行われ、事前設計としての工法と支保の選択が行わ

れる。

このように山岳トンネルにおける地山の特性評価は、非常に少ない情報に基づいて実施されており、情報化施工により随時地山条件を確認し、適切な支保構造とするかが重要となる。

一方、空間的な広がりを持つ地下発電所や地下備蓄タンクなどの大規模地下空洞の建設では、山岳トンネルのような線状構造物とは異なり、既存資料等により建設地点が選定されると複数の側線での弾性波探査や複数の地表からのボーリングなど山岳トンネルに比較すると格段に多くの調査が行われ、これらに基づいて建設地点の3次元地質状況が評価される。そしてこの結果に基づいて、構造の安定性を得やすい地下空洞の方向や深度、断面形状が決定され、数値解析を用いた検討等により施工法、支保構造が決定される。したがって施工中の情報化施工管理では、設計時に設定した地山条件を確認し、力学的安定性や空洞に期待する水封性、気密性などに問題がないかを検討することが主となる。

以上のような従来の岩盤構造物に比べ、その規模も大きく、格段に高い安全性が求められる高レベル放射性廃棄物処分施設の建設においては、情報化施工の役割は非常に重要であり、建設過程の中で如何に信頼性のある地山に関する情報を得、それを活用していくかが課題となる。

高レベル放射性廃棄物処分施設では、図5に示す概略建設フローに示すように候補地域が選定されると地質調査Ⅰとして既往の文献調査を行い、対象地域の中で有望な地点を選定する。次に地質調査Ⅱとして大規模な地質探査や地表からのボーリングなどの概要調査を行い、対象岩盤の3次元地質構造を把握し、概略の施設配置を行う。そして立坑位置を決定し、立坑の設計、施工を開始する。



図5 岩盤構造物の概略建設フロー

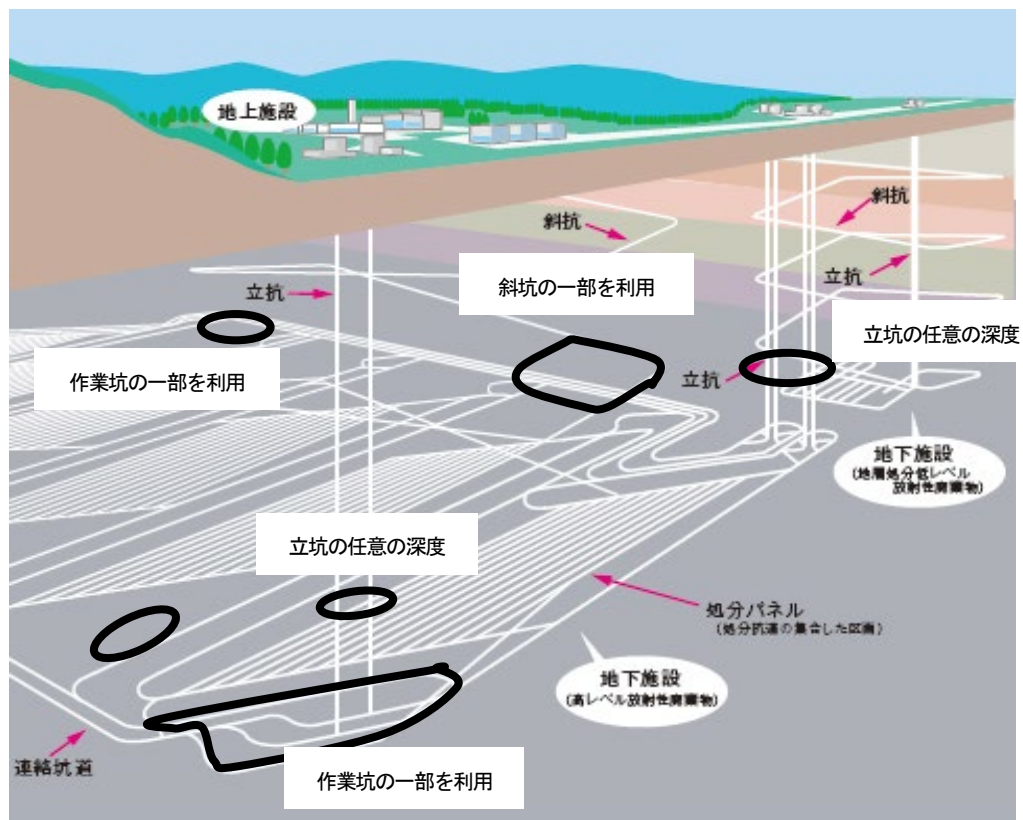


図6 処分施設と建設における初期応力検討用周回坑道のイメージ
(原子力発電環境整備機構パンフレットに示された処分場概念図に加筆)

立坑の施工時には、通常の山岳トンネルと同様の情報化施工を行い、施工の安全を確保するとともに、地質調査Ⅲ（精密調査）を実施し地質に関する詳細な情報を得て、地質調査Ⅱ（概要調査）で得られた地質情報の補完、拡充を行い、安全性が確保できるサイトであることを確認する。この場合、立坑や斜坑の任意の深度に設ける水平坑道や作業坑における地山特性（地質、力学、水理、化学など）に関わる詳細な調査・試験は、最終的な処分坑道や処分孔の設計の精度向上に寄与するものである。

この地質調査Ⅲの一環として図6に示すように、幌延の地下研究施設で実施したような大規模な周回坑道を各所に展開し、従来のトンネルにおける情報化施工の精度を上回る精度の地山挙動計測を実施し、得られたデータの逆解析により処分坑道を展開する地層の広域の初期応力を把握する。そしてこの結果に基づき処分坑道の配置、形状、支保の設計を行うとともに、処分坑道の力学的、水理的、熱的、化学的特性を念頭に置いた施工管理基準を設定する。この施工管理基準に基づいて処分坑道、処分孔の施工を進めて行くことにより、信頼性の高い処分施設の建設が可能となると考えられる。

6. おわりに

ここで示したように指針等はある程度整備されているものの、測定された初期応力をどう評価し、広域岩盤の原位置応力とするかについては重要問題とされつつもそれほど多くの議論はなされていない。それは、これまで岩盤の力学的問題を取り扱う様々な分野で必要とされる原位置応力について具体的な検討が行われたプロジェクトが限られ

ており、結果として岩盤原位置応力に関する測定例も評価事例もまだ少ないことによる。

岩盤応力測定結果の評価については、JAEAにおいても多くの研究が実施されてきた。佐藤ら（1998）、核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター（2001）、資源・素材学会（2002～2004）、NARA et.al.（2011）などの研究成果も勘案し、今回の検討結果をまとめると、以下のことが言えよう。

岩盤は不均質な材料であり、任意点の原位置応力はその不均質性を反映したものになっている。その大きさや深度方向の分布などの傾向は、均質性を仮定した弾性論などで予測される応力によって説明できるものの、実際の応力測定結果は、その弾性解を平均値（厳密な意味の平均ではない）とし大きくばらついている。すなわち、均質解が岩盤の不均質な分布や断層等の不連続面によって乱された結果となっている。したがって、ばらついている応力測定結果を評価する場合、単純に測定結果の平均を求めるだけでは岩盤の不均質性の影響が考慮されていないため、対象とする広域岩盤を代表する原位置応力を推定することは出来ない。この意味において内空変位計測に基づく原位置応力推定法は、逆解析時の数値モデルに不均質性を考慮することも可能であり、実際の岩盤条件を反映した結果を与えるものと考えられる。

しかし、解析モデルとして計測地点を含む不均質な岩盤モデルの作成は、そのモデルの境界条件（応力や変位）そのものもその境界外側の岩盤の不均質性の影響を受けており、確定した解析モデルを作ることは非常に難しい。特に断層の存在はその近傍の岩盤応力に大きな影響を与えることが指摘されているが、その断層を解析モデルで評価する場合、断層の力学的特性の評価は勿論、断層と境界部の取合いをどう表現するのかは難しい問題である。

このように原位置応力測定結果に基づいて広域岩盤の原位置応力を評価することは、非常に難しい。しかし評価に関わる多種多様の課題を学術的に追及することは重要であるものの、一方で際限のない議論となることで評価を確定させることが出来なくなってしまつては、問題は解決されない。高レベル放射性廃棄物処分場の設計・施工とその運用に関連して求められる原位置応力の評価においては、安全性を担保した工学的判断が必要となる。

すなわち事前調査によって得られた情報に基づいて岩盤応力測定を過不足なく実施するとともに、それらを岩盤の不均質性を考慮した手法により評価し設計・施工に反映させる。そして、施工の進展とともに得られる新たなデータに基づいて原位置応力の評価を更新する。また施工に当たっては、それまでの知見に基づいて設定された原位置応力の適用範囲を明確に定め、情報化施工管理基準を設定する。その上で、建設時には日常計測データからその岩盤の原位置応力が設定範囲内にあるのかどうかを判定し、範囲外にあると判断された場合には、処分坑道や処分孔の建設対象としない等の対策を講じる。

こうすることで、施設に求められる性能を担保した施工が可能となると考えられる。

文献

- Arno Zang , Ove Stephansson(2010) : Stress Field of the Earth's Crust, Springer, 319p.
- ベルナール・アマデイ, オーヴ・ステファンソン (2012) : 岩盤応力とその測定, 京都大学学術出版会, 639p.
- 核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター (2001) : 東濃鉱山における初期応力状態の評価解析, JNC TN7400 2001-004, 28p.
- 亀村勝美 (2017) : 岩盤構造物の性能評価における課題ー岩盤初期応力の推定方法についてー, 深田地質研究所年報, No.18, pp 193-208.
- 佐藤稔紀, 松井裕也, 杉原弘造 (1998) : 深地層を対象とした力学的調査の現状ー複数の手法を用いた初期応力測定についてー, 原子力バックエンド研究, Vol.4, No2, pp83-89.
- 資源・素材学会 (2002) : 3次元応力場の同定手法に関する研究 (核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書), JNC TJ7400 2001-012, 42p.
- 資源・素材学会 (2003) : 3次元応力場の同定手法に関する研究 (その2) (核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書), JNC TJ7400 2003-004, 70p.
- 資源・素材学会 (2004) : 3次元応力場の同定手法に関する研究 (その3) (核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書), JNC TJ7400 2004-011, 114p.
- 横山幸也 (2017) : 初期地圧測定法の現状と基準化, 応用地質技術年報, No.36, pp71-91.
- Yoshitaka NARA, Sang Ho CHO, Takaya YOSHIZAKI, Katsuhiko KANEKO, Toshinori SATO, Shigeo NAKAMA and Hiroya MATSUI(2011) : Estimation of three-dimensional stress distribution and elastic moduli in rock mass of the Tono area;, International Journal of the JCRM, Volume 7, Number 1, pp.1-9.