

幌延深地層研究センターにおける 原位置岩盤の強度・変形物性の検討

丹生屋 純夫^{1*}・青柳 和平²・藤田 朝雄²・白瀬 光泰¹

¹大成・大林・三井住友特定建設工事共同企業体（〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進432-2）

²国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進432-2）

*E-mail: niunoya.sumio@obayashi.co.jp

幌延深地層研究センターでは、き裂密度を考慮した岩級区分に基づいた岩盤の強度・変形物性を設定し、地下施設の支保設計や坑道の安定性の評価に採用している。本報告では、深度250mおよび350mの調査坑道内で実施した平板載荷試験、ロックせん断試験、および室内力学試験の結果から、設計時に設定した坑道規模の岩盤における強度・変形物性を評価した。ロックせん断試験により得られた粘着力は、設計時に設定した値と、三軸圧縮試験により得られた残留強度の応力状態から得た値よりも小さく、内部摩擦角は逆に大きい結果となった。また、設計時および室内力学試験の残留応力状態から設定した破壊規準との比較により、ロックせん断試験に基づく破壊規準は施工時において最も保守的な値を与えることが示された。

Key Words : *in-situ measurements, laboratory test, geomechanical conceptual model, neocene diatomaceous rock*

1. はじめに

トンネルや地下発電所、高レベル放射性廃棄物の地層処分場のような地下空洞の建設時には、原位置岩盤の力学的性質、特に変形・強度特性を把握することが重要である。岩石の力学的特性を把握するために、一軸・三軸圧縮試験や圧裂試験等の室内力学試験が実施される。これら室内力学試験からは、主に実際の岩盤中に含有される節理、層理、き裂などの不連続面や岩石の不均質性の影響を排除した、岩盤のインタクトな部分の物性値が得られる。一方、岩盤の不連続部や不均質性の影響を含有した岩盤物性を得るためには、平板載荷試験および原位置せん断試験が、ダム、地下発電所、橋梁などの基礎の調査に多く採用され、設計時に反映されている¹⁾。

本報告では、幌延深地層研究センターの深度250mおよび350mの調査坑道内で実施した平板載荷試験、ロックせん断試験の結果を基に、原位置岩盤の強度および変形特性について述べる。また、調査坑道の設計時には、き裂密度を考慮した岩級区分に基づいた岩盤の強度・変形物性を設定し、地下施設の支保設計や坑道の安定性の評価に採用しているが、それらの物性値と原位置試験により得られた値、室内力学試験により得られた値との比較を行い、設計時に設定すべき岩盤強度物性値について考察した。

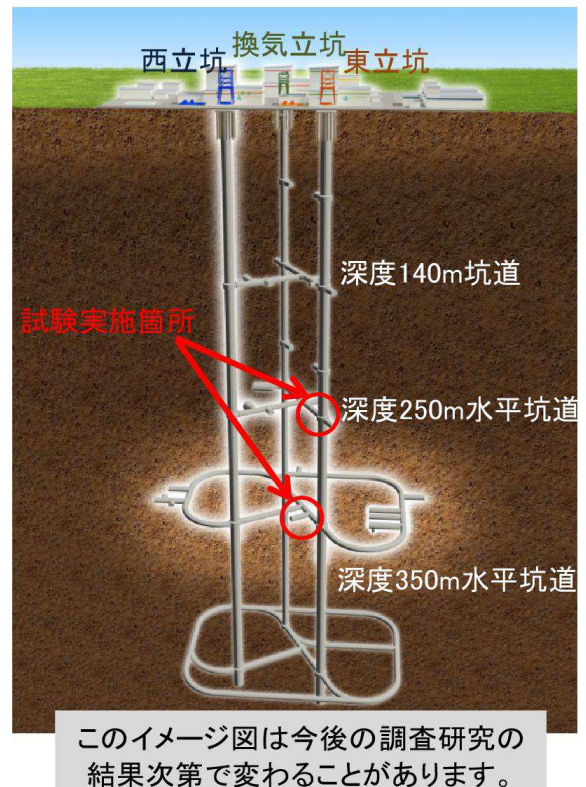


図-1 幌延深地層研究センターの地下施設レイアウト



写真-1 試験実施箇所底盤（深度 350m）

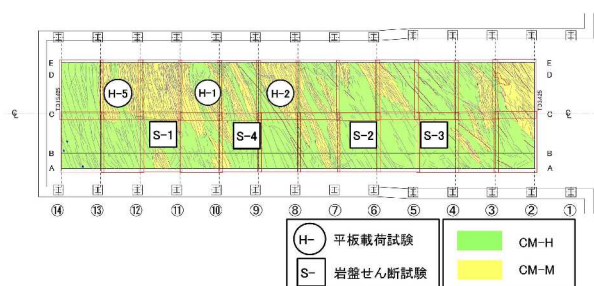


図-2 各試験実施箇所選定（深度 350m）



写真-2 試験箇所全景（深度 350m）

深度における試験対象とした。試験に先立ち、底盤の緩み領域を除去するとともに床面の平滑化を図ることを目的として、盤下げ作業が行われた。また、各深度において、同一の岩盤条件の下での原位置試験を実施するために、底盤の割れ目観察と、底盤3測線で実施した弾性波探査結果に基づき選定した。図-2に、深度350mにおける試験箇所設定例を示す。写真-2には、深度350mにおける試験箇所の全景を示す。

2. 原位置岩盤物性試験

(1) 幌延深地層研究センター概要

幌延深地層研究計画は、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構が平成12年度から開始した研究プロジェクトであり、地上からの調査研究段階（第1段階）、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）および地下施設での調査研究段階（第3段階）の3つの段階から構成され、現在は第3段階の調査研究に取り組んでいる²⁾。地下施設は、3本の立坑（東、西および換気）と深度140m、250mおよび350mの水平坑道によって構成されている（図-1 参照）。平成27年7月時点で、東立坑および換気立坑が深度380mまで、西立坑が365mまで掘削されており、深度140m、250mおよび350mの調査坑道の施工が完了している³⁾。

(2) 試験箇所の選定

原位置岩盤物性試験は、図-1に示す深度250mと350mのポンプ座と呼ばれる水平坑道内で実施した。写真-1に深度350mにおける試験実施箇所の現場写真を示す。

深度250mでは声問層（珪藻質泥岩）が、深度350mでは椎内層（珪質泥岩）が分布しており、これらの岩種を各

(3) 平板載荷試験

不連続面を包含する岩盤としての変形特性値を原位置試験から把握し、岩盤性状を評価する一指標とするため、平板載荷試験を実施した。実施試験数量については、土木学会の原位置岩盤試験法の指針¹⁾に基づき、同一の岩盤等級と評価される3地点を選定した。

試験面の整形後に、割れ目観察を実施して、対象岩級に相当することを確認すると共に凹凸状況を把握する目的で簡易的な高低差測量を実施した。その後、試験面の凹部を十分に埋めて載荷板と試験面を一体化させるためにジェットセメントを用いて径60cm範囲のフェーシングを行い、載荷板を乗せた状態で24時間以上養生後、試験を実施した。また、載荷板周辺でシュミットハンマー試験および簡易弾性波探査を実施して、試験面周辺の緩み等の状況を確認した。

深度250mおよび350mの調査坑道に作用する鉛直応力を単位体積重量と土被り高さから単純に算定すると、それぞれ3.9MPa、5.5MPaとなる。土木学会指針³⁾および既存文献⁴⁾に基づき、平板載荷試験の最大荷重は、岩盤中に生じる設計応力の1~2倍の範囲に含有される値として、深度250mでは4.0MPa、深度350mでは6.0MPaとした。載荷パターンは、予備載荷、5階段載荷、3回の繰り返し最大荷重載荷、持続載荷の順とした。載荷重は、反力を

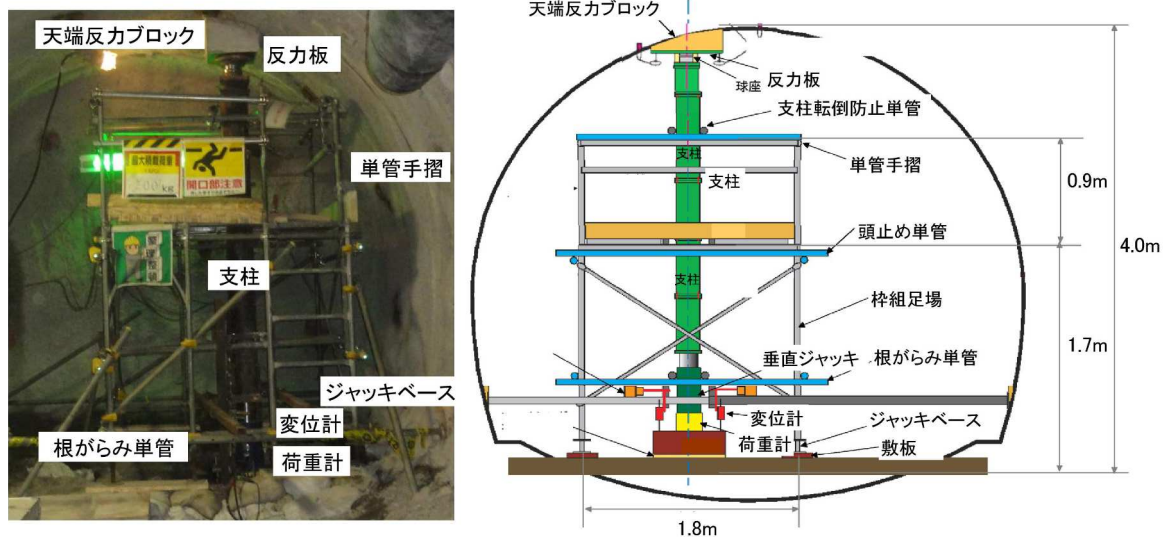


図-3 平板載荷試験装置

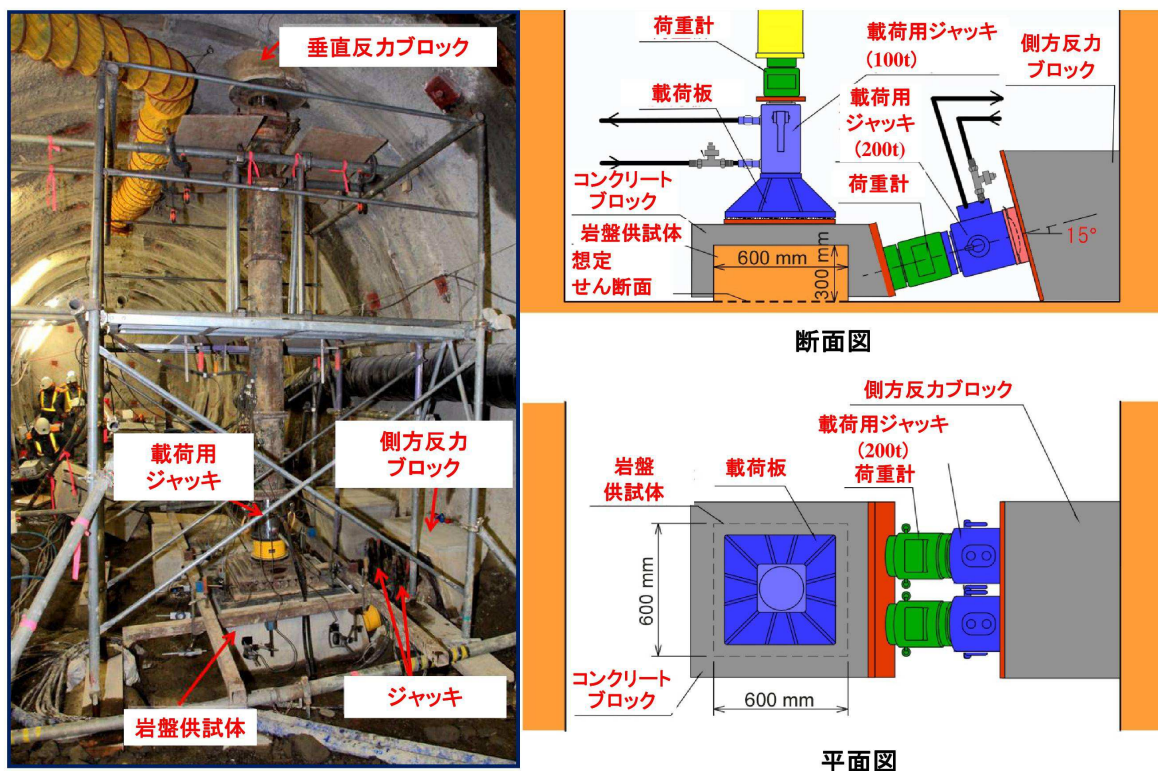


図-4 ロックせん断試験装置

坑壁天端に取り、容量2,000kNの油圧ジャッキにより載荷を行った。載荷圧力は荷重計（ロードセル）により読み取った。図-3に試験装置の設置概要図を示す。

(4) ロックせん断試験

不連続面を包含する岩盤としての強度特性値を原位置試験から把握し、岩盤性状を評価する一指標とするため、原位置岩盤せん断試験のうち、ロックせん断試験を実施した。試験の使用装置および機材等の仕様は、土木学会の指針³⁾および地盤工学会の基準⁵⁾に準拠した。

供試体の寸法は、60cm×60cm×30cmとした。今回の試

験では、試験箇所において、底盤からラインドリリングにより供試体を切り出し、周辺岩盤を電動ピックで掘り下げた。ただし、切り出し位置に近い箇所はノミなどで岩片を除去した。供試体切り出し作業に伴う岩盤の緩みを抑制する目的で、切り出しブロックの上面にコンクリート(50cm×50cm×50cm、重量130kg)を打設した。供試体周辺では、シュミットハンマー試験および簡易弾性波探査を行うとともに地質観察（スケッチ）を実施した。

試験体の切り出し後、反力ブロック側と併せて型枠を組立て、鉄筋カゴ配置後、コンクリートを打設した。この際、想定されるせん断面と傾斜荷重のなす角を15°

表-1 各試験箇所における平板載荷試験結果

	250m		350m	
	平板載荷試験	設計値	平板載荷試験	設計値
変形係数 (MPa)	380	360	1630	900
弾性係数 (MPa)	504	450	2290	1350

に設定した。

深度250mおよび深度350m調査坑道に作用する初期地圧状態を考慮し、深度250mでは、垂直荷重 N を0.1MPa, 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPaに、深度350mでは、0.1MPa, 1.2MPa, 2.4MPa, 3.6MPaのそれぞれ4種類に設定した。垂直荷重 N に関しては、はじめに予備載荷を行った後、所定の荷重に至るまで、載荷速度0.025MPa/minで加圧し、所定の値に達した後は、10分間以上持続させた。垂直荷重 N が持続載荷状態、すなわち変位速度が0.01mm/min程度になったことを確認した後に、傾斜荷重 T を0.01MPa/minで連続載荷で昇圧させた。破壊ピーク強度の確認後は残留強度の測定を行った。荷重および変位の計測は1分ごとに行った。載荷装置概要図を実写真と併せて図-4に示す。

試験により得られたせん断時の傾斜荷重 T および垂直荷重 N を、以下の式に代入して垂直応力 σ とせん断応力 τ の関係を導く。

$$\begin{aligned}\tau &= T \cos \theta / A \\ \sigma &= (N + T \sin \theta) / A\end{aligned}\quad (1)$$

式(1)中の A はせん断面の断面積を、 θ は傾斜荷重と底面のなす角（今回の試験では15°）を表す。得られた σ と τ の関係から、最小二乗法により粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を求め、モール・クーロンの規準を設定した。

3. 試験結果と設計値との比較

(1) 平板載荷試験

平板載荷試験の結果、得られた変形係数および弾性係数を、設計時に設定した値とともに表-1に示す。

表-1より、深度250mにおける平板載荷試験により得られた変形係数および弾性係数は、いずれも設計値の約1.1倍であった。一方、深度350mにおける平板載荷試験により得られた変形係数および弾性係数は、設計値よりも大きな値となった。特に、変形係数に関しては、設計値の1.8倍の値が得られた。

(2) ロックせん断試験

ロックせん断試験の結果、得られたデータ一覧を表-2に整理して示す。また、図-5に試験により得られたせん

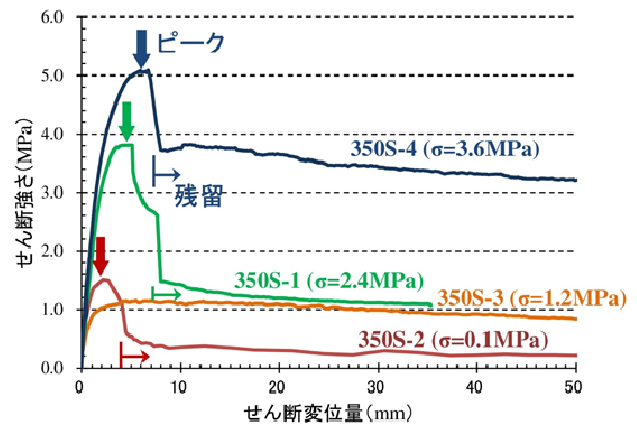


図-5 深度350mにおけるせん断変位-せん断強さの関係

表-2 各試験箇所におけるロックせん断試験結果

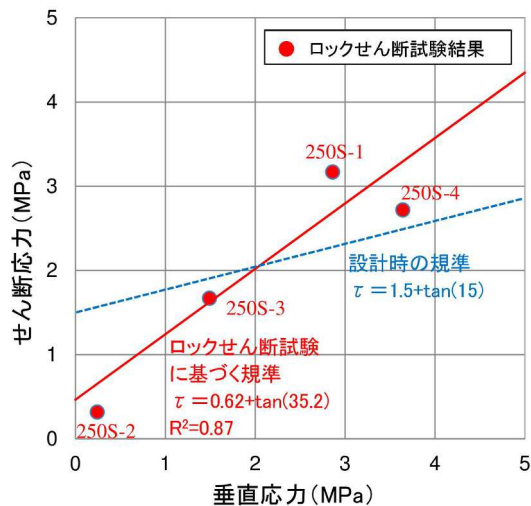
試験箇所	250m		試験箇所	350m	
	τ (MPa)	σ (MPa)		τ (MPa)	σ (MPa)
250S-1	3.17	2.86	350S-1	3.82	3.46
250S-2	0.32	0.24	350S-2	1.49	0.54
250S-3	1.67	1.49	350S-3	1.15	1.60
250S-4	2.72	3.64	350S-4	4.97	4.88

断変位量とせん断荷重の関係の例として、深度350mにおける各ケースのせん断応力-平均せん断変位の関係を示す。350S-1~4は、試験箇所を表す。図-5より、ケース350S-1, 350S-2および350S-4では、ピーク強度到達後にせん断荷重の急激な落ち込みが認められた。その後、残留強度に至るまで緩やかなせん断荷重の減少が認められたが、ケース350S-3は、明瞭なピーク強度を認めることが出来なかった。

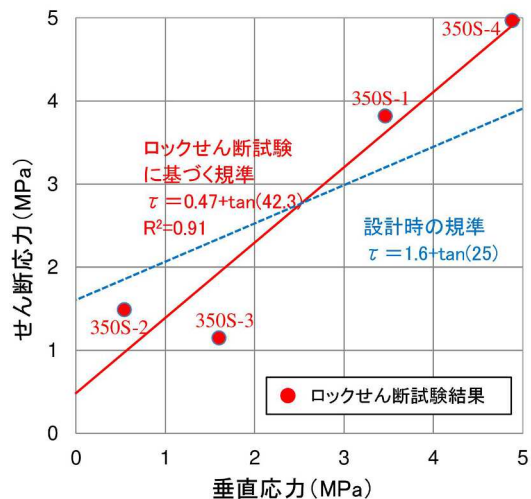
図-6には、深度250mおよび350mにおけるロックせん断試験結果と、設定したモール・クーロンの破壊規準線を示す。また、設計時に設定した破壊規準線を破線で示す。

図-6(a)に示す深度250mの結果では、垂直荷重が3.0MPaの結果が、他の3点と比較して小さなせん断応力を示すものの、ピーク強度4点から求めた回帰直線、すなわち破壊規準(図中、赤実線で示す)は、 $\tau = 0.62 + \sigma \tan 35.2^\circ$ となり、 $R^2 = 0.87$ の相関性を持った比例関係が得られた。破線で示した設計時に設定した破壊規準線と比較すると、設計時よりも粘着力 c が小さく、内部摩擦角 ϕ が大きい結果となった。

図-6(b)に示す深度350mの結果では、初期垂直荷重0.1, 2.4, 3.6MPaにおけるせん断荷重は、垂直荷重1.2MPa(ケース350S-3)の試験値と比較して小さな値を示したものの、破壊ピーク強度4点から求めた破壊規準は、 $\tau = 0.47$



(a) 深度250m



(b) 深度 350m

図-6 ロックせん断試験結果，得られた破壊規準と，設計時の規準の比較

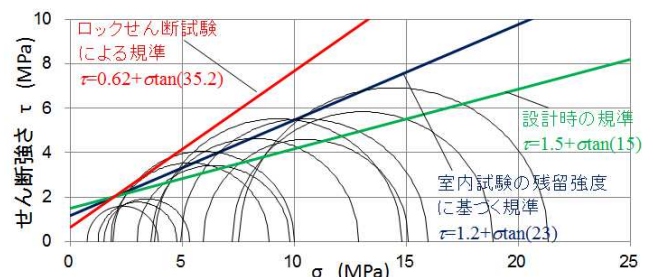
$+ \sigma \tan 42.3^\circ$ となり， $R^2=0.91$ の相関性を持った比例関係が得られた．破線で示した，設計時にき裂密度を考慮した岩盤区分に基づいて設定した破壊規準線と比較すると，設計時よりも粘着力 c が小さく，内部摩擦角 ϕ が大きい結果となった．これは，深度250mで得られた傾向と同様である．

4. 強度物性に関する考察

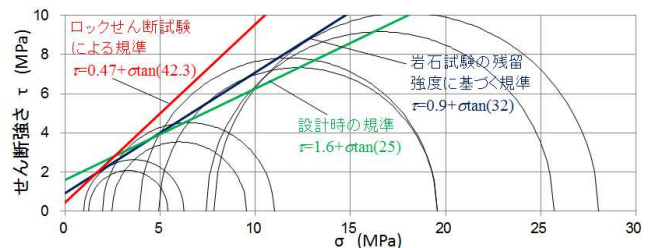
幌延深地層研究センターでは，地下施設周辺の地表からの調査ボーリングにより得られたき裂密度を考慮した岩級区分に基づいた岩盤の強度・変形物性値を設定し，これらを地下施設の支保設計や坑道の安定性の評価に採用している⁹⁾．設計時に設定した強度特性について，ロックせん断試験および室内力学試験により得られた強度

表-3 強度特性値結果一覧

	250m			350m		
	ロック せん断 試験	設計値	残留強度 (三軸圧 縮試験)	ロック せん断 試験	設計値	残留強度 (三軸圧 縮試験)
c (MPa)	0.62	1.5	1.2	0.47	1.6	0.9
ϕ (°)	35.2	15	23	42.3	25	32



(a) 深度 250m



(b) 深度 350m

図-7 三軸圧縮試験の残留強度応力から設定した破壊包絡線と，設計時の破壊規準，ロックせん断試験結果に基づき設定した破壊規準の比較

特性を比較する．

深度250mおよび350mにおけるロックせん断試験に基づく強度物性を，設計時の強度物性，三軸圧縮試験の残留強度から求めた強度物性ととも表-3に示す．表-3より，深度250mおよび350mの両者において，ロックせん断試験により得られた粘着力 c は，設計値および残留強度から求めたよりも小さく，内部摩擦角 ϕ はそれらよりも大きいことがわかった．この原因としては，両者の試験条件，供試体寸法，および供試体中のき裂密度などの違いが考えられるが，詳細については今後の検討課題とする．

次に，室内試験により得られた残留強度物性と原位置せん断試験により得られた強度物性との比較を行う．室内力学試験により得られた残留強度は，岩石が破壊後に保持している強度を示しているため，残留強度に対する粘着力と内部摩擦角は，地下空洞の施工時の空洞安定性に対して最も厳しい条件を与えると考えられる⁷⁾．そこ

で、深度250mおよび350mを対象として、既存の三軸圧縮試験結果により得られた残留強度の応力状態を示すモデル円群上に、今回のロックせん断試験により得られた破壊規準線と、設計時に設定した破壊規準線、残留強度特性の破壊包絡線を図-7に示す。

図-7より、低拘束圧条件では、ロックせん断試験による破壊規準は、深度250mおよび350mの両者において、室内試験により得られた残留強度から設定した破壊規準および設計時の規準を下回る結果となった。坑道掘削時は、壁面周辺岩盤に生じる最小主応力値が0に近い値をとる。このことから、坑道掘削時には、低拘束圧条件における安定性の議論が重要となる。したがって、ロックせん断試験により得られた強度物性は、坑道の施工に対して最も保守的な値を与えているといえる。

以上の観点から、坑道掘削時において、最も保守的な条件で施工を行う場合は、ロックせん断試験により得られた原位置岩盤の粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を採用し、岩盤物性を更新していくことで、後続の水平坑道および立坑掘削時の効率的かつ安全な支保設計に資することが可能であると思われる。

5. おわりに

本報告では、幌延深地層研究センターの深度250mおよび350mの調査坑道内で実施した平板載荷試験、ロックせん断試験の結果を基に、原位置岩盤の強度および変形特性について論じた。また、調査坑道の設計時に設定した岩盤物性値と原位置試験により得られた値、室内力学試験により得られた値との比較を行い、設計時に設定すべき岩盤強度物性値について考察した。得られた成果は以下のとおりである。

- 1) 平板載荷試験により得られた変形係数および弾性係数は、深度250mでは設計時に設定した値の約1.1倍となった。一方、深度350mでは、設計時に設定した値

よりも大きな結果となった。特に弾性係数は、設計値の1.8倍となった。

- 2) 深度250mおよび350mにおいて、ロックせん断試験により得られた粘着力 c は、設計時の値よりも小さく、内部摩擦角 ϕ は、設計時よりも大きな値が得られた。
- 3) ロックせん断試験に基づく破壊規準は、設計時に設定した破壊規準、室内試験の残留強度に基づく破壊規準と比較して、坑道掘削時に相当する低拘束圧条件において、施工に対して最も保守的な値を与えているといえる。

今回は室内及び小規模の試験仕様を一部参考に実施したが、今後、高レベル放射性廃棄物処分施設のような大規模、大深度の岩盤地下空洞を施工する際は、原位置岩盤試験の実施により支保設計や空洞安定性の評価に適用していくことが望ましいと考えられる。

謝辞：調査坑道内における平板載荷試験およびロックせん断試験の実施に当たっては、基礎地盤コンサルタンツ株式会社の廣林氏、知本氏にご尽力いただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) (社)土木学会：原位置岩盤試験法の指針, 2000.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：JNCTN1400 99-022, 1999.
- 3) 日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画 平成26年度調査研究成果報告, 2015.
- 4) 電力土木技術協会：電力施設地下構造物の設計と施工, 1981.
- 5) (社)地盤工学会：剛体載荷板による岩盤の平板載荷試験方法, JGS 3521-2003, 2003.
- 6) 日本原子力研究開発機構：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.
- 7) 青柳和平, 石井英一, 近藤桂二, 津坂仁和, 藤田朝雄：幌延深地層研究所における三軸圧縮試験による岩石強度特性の検討, JAEA-Research 2015-001, 2015.

AN INVESTIGATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF IN-SITU ROCK MASS AT THE HORONOBÉ UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY

Sumio NIUNOYA, Kazuhei AOYAGI, Tomoo Fujita and Mitsuyasu SHIRASE

In the Horonobe Underground Research Laboratory, rock mass classification and determination of mechanical properties of rock mass was conducted considering the effect of the density of fractures in the rock mass. In this paper, the authors report the mechanical properties of rock mass detected by plate loading tests and in situ shear tests in the 250 m and 350 m galleries. As a result, the failure criteria based on the result of in situ shear tests provides the most conservative value for the design of support pattern and assessment of stability of the gallery.