

幌延深地層研究計画における 立坑工事の施工実績とサイクルタイム分析 PROGRESS OF SHAFT CONSTRUCTION AND CYCLIC TIME ANALYSIS IN THE HORONobe UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY PROJECT

山崎 雅直¹・関谷 美智²・藤川 大輔²・北川 義人³
Masanao YAMASAKI・Yoshitomo SEKIYA・Daisuke FUJIKAWA・Yoshito KITAGAWA

The shafts and drifts of the Horonobe Underground Research Laboratory Project have been constructed by JAEA. The construction method of shaft is a short step method. The excavation system of Access Shaft (East Shaft) is the blasting excavation, and the excavation system of Ventilation Shaft is the machine excavation. At the present, the East Shaft was excavated G.L.-140.5m in depth and the Ventilation Shaft was excavated G.L.-210.5m in depth at the end of July, 2008. The difference in depth change or an excavation system was analyzed about the excavation time which occupies about 40% of the cycle time of each shaft. This paper reports the outline of the construction track record of the shafts and the result of having analyzed cycle time paying attention to excavation time.

Key Words : shaft, short step method, construction results, cycle time

1. はじめに

北海道幌延町において，（独）日本原子力研究開発機構が実施している幌延深地層研究計画は，堆積岩を対象とした地下研究施設の建設を伴う研究プロジェクトである。

地下研究施設は，最終的には深度約 500m 程度の立坑 3 本（連絡立坑 2 本，換気立坑 1 本）と試験研究用の水平坑道から構成される計画である（図-1）。坑道断面は連絡立坑（東立坑・西立坑）が内径 6.5m，換気立坑が内径 4.5m，水平坑道が内空幅 4m を標準とし，断面形状は立坑が円形，水平坑道は三芯円馬蹄形である。地下研究施設の建設工事は，現在 2 つの立坑（換気立坑，東立坑）の建設を進めており，平成 20 年 7 月末時点で，東立坑は深度 140.5m まで，換気立坑は深度 210.5m まで終了している。

本稿では，今後の立坑工事の積算精度の向上と積算手法の体系化の検討に役立てる基礎データとすることを目的として，これまで実施した立坑工事の施工実績の概要ならびに掘削時間に注目してサイクルタイムを分析した結果を報告する。また，本分析の成果は，地層処分施設の建設を念頭においた工事工程管理や工事費用の積算に反映できるものである。

2. 地質概要

地下研究施設周辺の岩盤は，主として新第三紀堆積岩（珪藻質泥岩および珪質泥岩）からなる。そして，地下研究施設近傍の深層ボーリング孔にて実施した調査結果から，地下研究施設周辺に分布する岩盤の工

キーワード：立坑，ショートステップ工法，施工実績，サイクルタイム

¹正会員 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット

²正会員 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

³正会員 大成建設㈱ 札幌支店

学的特徴は、軟岩（一軸圧縮強さは5～25 MPa）であるが、割れ目やヘアークラックのような不連続面の存在が岩盤の力学的特性（強度・変形特性）に影響を与える可能性のあることがわかった。地下研究施設の支保設計では、これらの割れ目および潜在的な不連続面の影響を考慮し、岩盤等級を岩石コアの硬さ・割れ目頻度・ヘアークラックの有無の3つの指標を用いて、表-1に示すように区分した^{1), 2), 3)}。

3. 工事概要

立坑の施工方法は、1 m×2回の掘削後に覆工コンクリートを打設する変則的なショートステップ工法であり、水平坑道は全断面NATM工法である。掘削方式は、換気立坑は積込機一体型の自由断面掘削機を使用した機械方式、東立坑は発破方式、140m水平坑道はブレーカによる機械方式である。

4. 施工実績

(1) 施工実績

平成17年11月より地下施設工事を開始し、地上から換気立坑深度51.1mまでと東立坑深度42.1mまでの坑口部はバックホウによる掘削を行い、換気立坑51.1m以深と東立坑42.1m以深の一般部は、スcaffordと櫓設備を使用して施工を行っている。各立坑のスcaffordと櫓設備を使用した施工フローを図-2(1)と図-2(2)に示す。換気立坑においては、積込機一体型の自由断面掘削機を掘削に使用し、積込機は掘削土の積

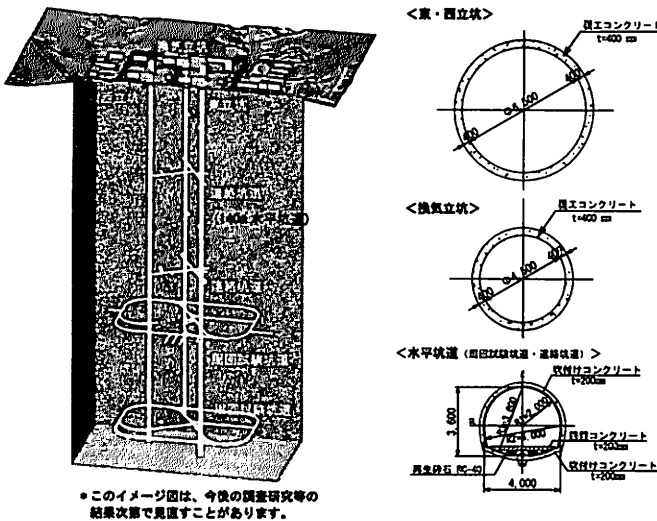


図-1 地下研究施設イメージ図および坑道標準断面図

表-1 ボーリングコアに基づく岩盤等級区分^{1), 2), 3)}

岩盤等級区分	割れ目頻度	ヘアークラック	岩石コアの特徴
D		—	カッターの刃が2mm以上剥かる コアは角礫状～岩片状～粘土状を示す
CL	L	—	カッターの刃が1mm程度剥かる コアは角礫状～岩片状を示す
	M	有・無	カッターの刃が1mm程度剥かる コアは直径10cm未満の短柱状を主体とする
	H	有・無	カッターの刃が1mm程度剥かる コアは直径10cm以上の長柱状から棒状を主体とする
CM	L	—	カッターの刃で傷が付く程度 コアは角礫状～岩片状を示す
	M	有・無	カッターの刃で傷が付く程度 コアは直径10cm未満の短柱状を主体とする
	H	有・無	カッターの刃で傷が付く程度 コアは直径10cm以上の長柱状から棒状を主体とする

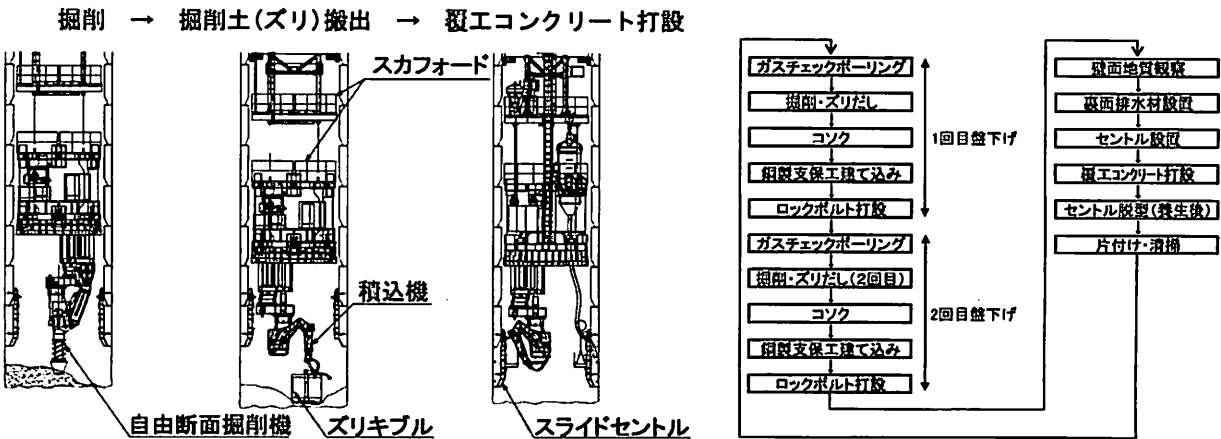


図-2(1) 換気立坑施工フロー

掘削 → 掘削土(ズリ)搬出 → 覆エコンクリート打設

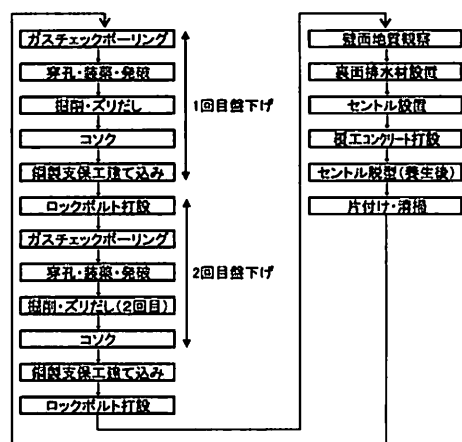
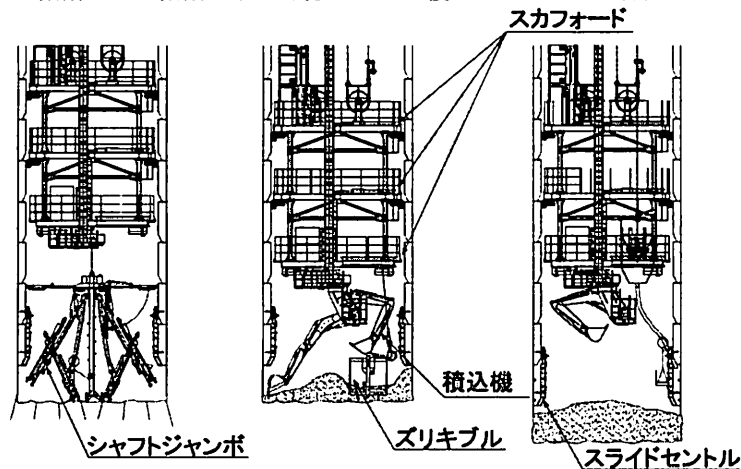


図-2(2) 東立坑施工フロー

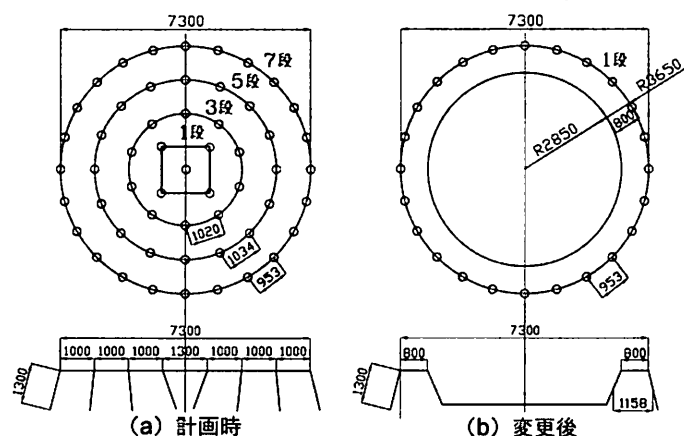


図-3 発破パターン図

		計画時	変更時
火薬量	(kg)	5.5	1.6
雷管数	(本)	55	16
火薬量	(kg/m ³)	0.13	0.04
雷管数	(本/m ²)	1.31	0.38

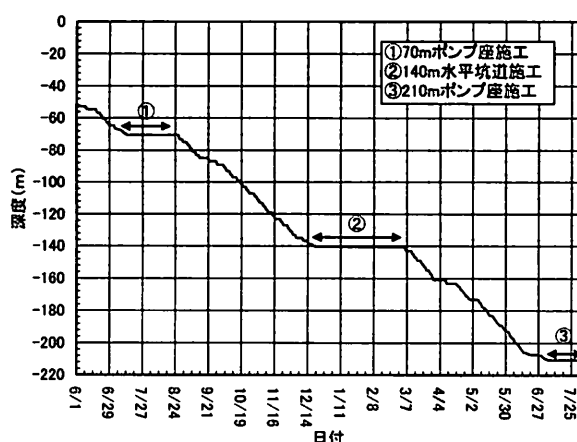


図-4 立坑一般部工事進捗図 (左側：換気立坑, 右側：東立坑)

込用として計画していた⁴⁾が、対象としている岩盤が想定した強度(5MPa程度(声問層))よりも低いため、主に積込機による掘削を実施し、壁面の整形に自由断面掘削機を使用した。

東立坑において、装薬パターンは計画時では図-3(a)としていたが、同様の理由により、図-3(b)に見直す(実施時の火薬量は計画時の1/3以下)とともに、装薬前に先行して深さ1m程度の壺掘りを実施した。

図-4に各立坑の一般部における工事進捗図を示す。平均月進は換気立坑が14m、東立坑が10mであり、概ね計画通りであった。最大月進は、換気立坑が22m(平成19年11月)、東立坑が21m(平成19年9月)であった。

また、これまでの施工実績における掘削中心からの偏心量は、最大で換気立坑が10mm、東立坑が13mmと仕上がり内径(換気立坑4.5m、東立坑6.5m)に対して0.2%程度であり、施工は概ね良好であった。

(2) 岩盤等級評価結果

立坑工事に先立ち、策定した計測計画ならびに情報化施工プログラム⁵⁾に基づいて、各切羽の岩盤等級評価を行った。

各切羽の壁面観察結果より、換気立坑は地表から深度25m程度まで、東立坑は深度20m程度までが未固結堆積物であり、それ以深は、換気立坑ならびに東立坑ともに声間層（珪藻質泥岩）であり、岩石はカッターの刃が1mm程度刺さる硬さであった。

これまでの施工実績のうち声間層における全壁面に対する割れ目頻度の分布状況を表-2に示す。同表より東立坑は中密度（割れ目間隔10cm未満）の割合が多く、換気立坑は低密度（割れ目間隔10cm以上）の割合が多い。また、局所的に高密度（角礫状～岩片状）が確認されている。ヘアークラックは概ね全線で認められている。局所的に適水程度の湧水が認められている。

各切羽の壁面観察結果より表-1に基づいて判定した岩盤等級評価結果を表-3に示す。設計と実績の比較から、実績での岩盤等級評価は、設計に対して同ランク、またはそれ以上の評価であった。東立坑はCL-M（Hr有）の割合が多く、換気立坑はCL-H（Hr有）の割合が多い。図-5はエコーチップ硬さ試験より得られるエコーチップ反発硬度と一軸圧縮強さの相関関係に基づいて一軸圧縮強さを推定した結果と立坑深度との関係を示し、あわせて、推定した一軸圧縮強さを土被り圧で無次元化した地山強度比と立坑深度との関係を示したものである⁶⁾。岩石の強さは、図-5に示すように深度に依らず概ね同じであり、また、上述したようにヘアークラックは概ね全線で確認されているため、割れ目頻度分布状況の違いがそれぞれの立坑の岩盤等級評価に反映されている。

(3) サイクルタイム実績

1サイクル2mのショートステップ工法による立坑工事のサイクルタイム実績を表-4に示す。サイクルタイムの分析に用いたデータは、換気立坑51.1m以深から深度210.5mまで、東立坑42.1m以深から深度140.5mまでの一般部として、その平均値をサイクルタイム実績とした。ただし、断面を拡幅している接続部区間（深度66.6m～70.5m、深度135.8m～140.5m、深度205.8m～210.5m）は対象外とした。

表-2 割れ目頻度分布状況（声間層）

割れ目頻度	高密度 L (角礫状～岩片状)	中密度 M (割れ目間隔10cm未満)	低密度 H (割れ目間隔10cm以上)
東立坑	2%	51%	47%
換気立坑	1%	22%	77%

表-3 岩盤等級評価結果

岩盤等級	東立坑				換気立坑			
	設計		実績		設計		実績	
	延長 (m)	比率 (%)	延長 (m)	比率 (%)	延長 (m)	比率 (%)	延長 (m)	比率 (%)
D	20	14%	20	14%	25	12%	25	12%
CL-L (Hr有)	30	21%	1	1%	29	14%	0	0%
CL-M (Hr有)	90	65%	87	62%	140	67%	65	31%
CL-H (Hr有)	0	0%	32	23%	16	7%	120	57%
合計	140	100%	140	100%	210	100%	210	100%

「Hr有」とは、ヘアークラック有りのことである。

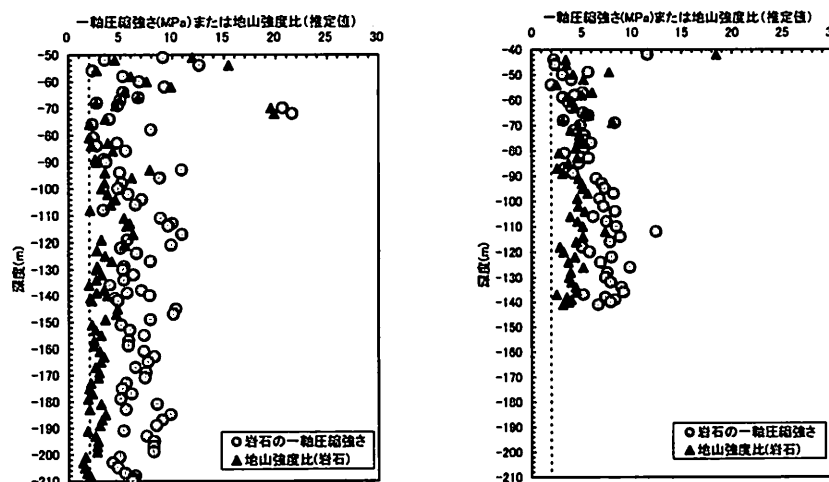


図-5 岩石の一軸圧縮強さと地山強度比の深度分布（左側：換気立坑，右側：東立坑）⁶⁾

表-4 サイクルタイム実績

作業工程	換気立坑						東立坑					
	CL-M(Hr)		CL-H(Hr)		全体		CL-M(Hr)		CL-H(Hr)		全体	
	実績(分)	割合(%)	実績(分)	割合(%)	実績(分)	割合(%)	実績(分)	割合(%)	実績(分)	割合(%)	実績(分)	割合(%)
1. ガスフェックボ-リング	22	1%	18	1%	19	1%	16	1%	19	1%	17	1%
2. 穿孔・装薬・発破	-	-	-	-	-	-	62	3%	72	3%	65	3%
3. 掘削・ズリだし	960	45%	1004	45%	989	45%	713	32%	608	29%	683	31%
4. コソク	52	2%	54	2%	53	2%	59	3%	75	4%	64	3%
5. 鋼製支保工建て込み	87	4%	97	5%	94	5%	108	5%	97	5%	105	5%
6. 壁面地質観察	152	7%	152	7%	152	7%	146	7%	137	7%	143	7%
7. ロックボルト打設	100	5%	108	5%	105	5%	123	5%	132	6%	126	6%
8. 裏面排水材設置	51	2%	54	2%	53	2%	52	2%	43	2%	49	2%
9. セントル設置・脱型	353	17%	375	17%	367	17%	499	22%	405	20%	473	22%
10. 樹工コンクリート打設	275	13%	262	12%	266	12%	351	16%	338	16%	347	16%
11. 樹失(片付け+消掃)	77	4%	89	4%	85	4%	87	4%	138	7%	101	4%
合計	2129	100%	2213	100%	2183	100%	2216	100%	2064	100%	2173	100%
方数(1方540分)	3.9		4.1		4.0		4.1		3.8		4.0	

表-4より平均サイクルタイムは2,173分～2,183分の範囲にあり、1方を540分とすると換気立坑、東立坑共に平均4方程度であった。岩盤等級で比較すると、各作業工程に要した時間の違いはあるが、全体的にはほぼ同じサイクルタイムであり、岩盤等級の違いによるサイクルタイムの違いはみられなかった。

同表より掘削に関わる作業項目を換気立坑では3.掘削・ズリだしと4.コソク、東立坑では2.穿孔・装薬・発破から4.コソクまでとした場合の掘削時間は、全体の37～47%程度であった。

5. サイクルタイム分析

立坑工事のサイクルタイムの37～47%程度を占める掘削時間のうち、深度の違いや岩盤等級の違いに着目してサイクルタイム分析を行った。各サイクル毎の掘削時間と深度との関係について、換気立坑は図-6に、東立坑は図-7に示す。各図中には、最大値と最小値を破線で、平均値を実線で示し、各数値を表-5に示した。図-6と図-7より、岩盤等級は主にCL-M(Hr)とCL-H(Hr)であるが、岩盤等級の違いによる掘削時間の変化は見られない。また、深度方向の掘削時間は、大きな変化は見られず、深度に伴う増加は認められない。これは、図-5に示したように一軸圧縮強さや地山強度比には深度に伴う大きな変化が見られず、ほぼ同じ硬さの岩盤を掘削しているためであると考ええる。

一方、図-6と図-7より換気立坑は東立坑に比べて、最大1.5倍程度掘削に時間を要している。これは、掘削径が異なること（東立坑7.3m、換気立坑5.3m）やズリ出し用のバケット（以下、ズリキブルと称す）の容量が異なること（東立坑4.0m³、換気立坑1.5m³）に関係している。

そこで、換気立坑の掘削時間について、掘削径とズリキブルの容量を考慮して、掘削時間換算値（＝掘削時間×掘削断面積比／ズリキブル容量比）として正規化した。その結果、図-8に示すように換気立坑（換算値）の掘削時間の平均値やばらつきは、東立坑と同じ程度であった。

今回の分析対象は一軸圧縮強さが5～10MPa程度の軟岩であり、深度に依存しないほぼ同じ岩盤の力学的特性であるため、換気立坑（換算値）も東立坑も同じ程度の掘削時間であり、岩盤等級による違いも見られないと考える。

今後立坑掘削が進むと、深度250mを境に声間層(珪藻質泥岩)から稚内層(珪藻泥岩)へ地層が変化する。地下研究施設近傍の深層ボーリング孔にて実施した調査結果⁷⁾より、稚内層の岩盤は声間層よりも硬くなることがわかっているため、稚内層における立坑掘削では、それぞれの掘削方式の違いが明らかになると考える。

6. まとめ

今回の幌延深地層研究計画における立坑工事の施工実績とサイクルタイムを分析して得られた知見を以下にまとめる。

- ・1サイクル2mのショートステップ工法における立坑工事のサイクルタイムは約4方であり、そのうち37～

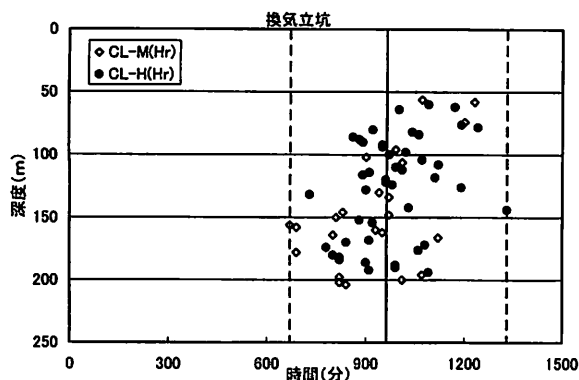


図-6 深度と掘削時間の関係（換気立坑）

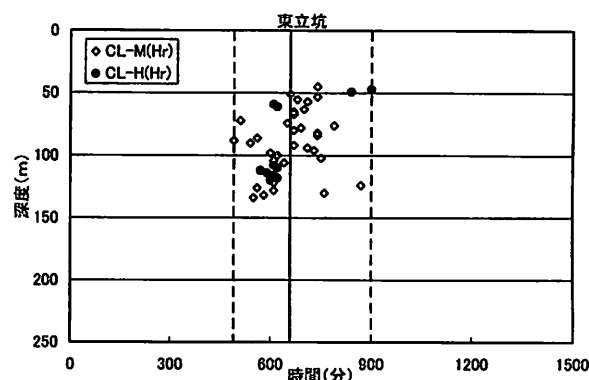


図-7 深度と掘削時間の関係（東立坑）

表-5 サイクルタイム実績一覧表

	東立坑 (分)	換気立坑 (分)	換気立坑 (換算値) (分)
最大	900	1330	946
最小	490	670	477
平均	659	964	684

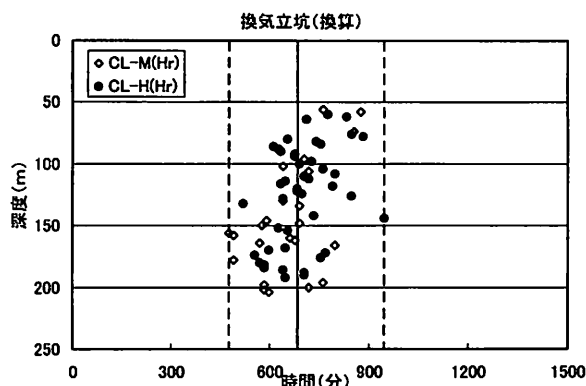


図-8 深度と掘削時間の関係（換気立坑（換算値））

47%程度は掘削時間であった。そして、岩盤等級の違いによるサイクルタイムの違いはみられなかった。

- ・換気立坑の掘削時間を掘削径やズリキブルの容量で正規化すると、掘削時間は発破方式も機械方式も概ね同程度であり、掘削方式の違いは見られなかった。そして、本検討範囲では、深度変化に伴う岩盤の力学的特性の変化は無かったため、岩盤等級による違いは見られなかった。

地下施設工事は今後も継続実施していく計画であり、声間層から稚内層へと地層が変化していくため、立坑工事に伴うサイクルタイムの変化を注視していくと共に、今後の立坑工事の積算精度の向上と積算手法の体系化の検討に役立てていく予定である。

参考文献

- 1) 森岡宏之，尾留川剛，村川史朗，菅原健太郎，小林隆志：幌延深地層研究計画における地下研究坑道の支保設計，土木学会，第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集（CD-ROM），pp. 69-74，2006。
- 2) 尾留川剛，森岡宏之，山上光憲，村川史朗：幌延深地層研究計画における地下研究坑道の概要と支保設計，電力土木技術協会，電力土木，平成18年7月号，pp. 82-86，2006。
- 3) 山崎雅直，森岡宏之，羽出山吉裕，津坂仁和：幌延深地層研究計画における立坑掘削の情報化施工と挙動計測，第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 305-310，2008。
- 4) 一安謙治，尾留川剛，小島亘，北川義人：深度500mの立坑を積み込み機一体型自由断面掘削機で掘る－幌延深地層研究計画地下施設－，トンネル技術協会，トンネルと地下，平成19年10月号，pp. 35-42，2007。
- 5) 森岡宏之，山口雄大，舟木泰智，尾留川剛：幌延深地層研究計画における立坑掘削時の計測計画及び情報化施工プログラム，JAEA-Research2007-050，2007。
- 6) 津坂仁和，山崎雅直，羽出山吉裕，山本卓也：幌延深地層研究所の立坑掘削に伴うコンバージェンス曲線の評価，第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 311-317，2008。
- 7) 山本卓也，下茂道人，藤原靖，服部弘通，名合牧人，田所照夫，中垣真一：幌延深地層研究計画における試錐調査（HDB-6，7，8孔）のうちHDB-6孔，JNC TJ5400 2005-004，2005。