

# 立坑掘削における内空変位の初期変形率と覆工コンクリート応力の相関

山崎 雅直<sup>1\*</sup>・津坂 仁和<sup>1</sup>・羽出山 吉裕<sup>2</sup>・南出 賢司<sup>2</sup>・高橋 昭博<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門(〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432-2)

<sup>2</sup> 大成建設(株) 札幌支店(〒060-0061 北海道札幌市南1条西1-4)

<sup>3</sup> (株) エーティック 計測部(〒063-0801 札幌市西区二十四軒1条5丁目 6-1)

\*E-mail: yamasaki.masanao@jaea.go.jp

(独) 日本原子力研究開発機構は、北海道幌延町において地下研究施設を建設中であり、その立坑掘削工事においては、地下空洞の安定性や支保部材の健全性を評価する目的で、内空変位や覆工コンクリート応力等を計測・分析している。本報告では、立坑掘削時に取得した内空変位計測結果と覆工コンクリート応力計測結果から、初期変形率と覆工コンクリート応力の収束値(土被り圧で無次元化)を整理し、両者の相関について考察した。その結果に基づいて、ショートステップ工法による立坑掘削を念頭においた内空変位の初期変形率から覆工コンクリート応力の収束値の予測式を提案した。

**Key Words :** shaft excavation, convergence, initial deformation ratio, lining stress

## 1. はじめに

(独) 日本原子力研究開発機構は、北海道幌延町において、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を実施している。地下研究施設は、最終的には深度約500m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)で内径6.5m、換気立坑で内径4.5m、水平坑道で内空幅4mを標準とし、断面形状は立坑が円形、水平坑道が三芯円馬蹄形である。

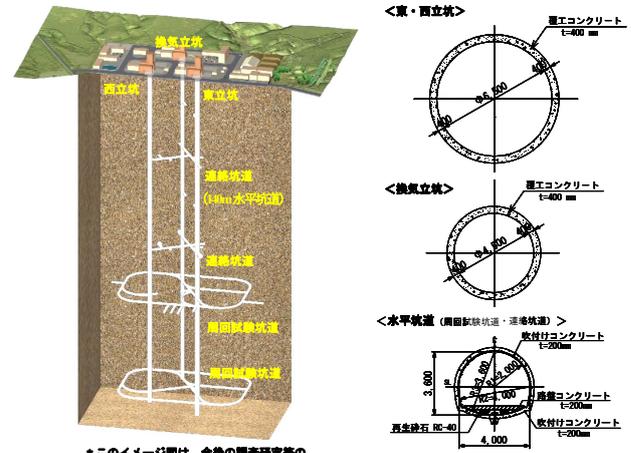
地下研究施設の建設工事は、現在2つの立坑(東立坑、換気立坑)の建設を進めており、平成20年8月末時点で、東立坑140.5m、換気立坑223.0mまで終了している。立坑の施工はショートステップ工法を採用している。

立坑の支保は、支保部材に作用する応力が許容応力度の範囲内となるように設計している。立坑掘削に伴う地下空洞の安定性や支保設計の妥当性を評価する目的で、内空変位、地中変位や覆工コンクリート応力等を計測・分析している。

ショートステップ工法による立坑掘削に伴う地山挙動を評価した事例は、瑞浪超深地層研究所の研究坑道<sup>1)</sup>や中部縦貫自動車道の安房トンネルにおける換気立坑トンネル<sup>2)</sup>が公開されている。しかし、これらは、計測結果

に基づく地下空洞の安定性や支保部材の健全性の評価までにとどまり、後続の設計や施工に反映した結果は示されていない。

本報告では、まず、地下研究施設の立坑掘削時に取得した内空変位計測データと覆工コンクリート応力計測データから、地下空洞の安定性や支保部材の健全性の評価を行った。次に、内空変位の初期変形率と覆工コンクリート応力の収束値(土被り圧で無次元化)の相関について考察し、ショートステップ工法による立坑掘削を念頭においた内空変位の初期変形率から覆工コンクリート応力の収束値の予測式を提案した。初期変形率から覆工コ



\*このイメージ図は、今後の調査研究等の結果次第で見直すことがあります。

図-1 地下研究施設イメージ図および坑道標準断面図

ンクリート応力の収束値を予測できると、施工における覆工コンクリート応力の管理基準値の設定や覆工コンクリートの設計基準強度の変更や吹付けコンクリートの追加のような支保部材の修正に反映できると考えられる。

## 2. 内空変位と覆工コンクリート応力の計測方法の概要

### (1) 情報化施工

幌延深地層研究計画では、地上からの調査に基づき、地下環境をモデル化し、地下研究施設建設に伴う影響を予測した結果の妥当性を検証するため、取得した計測データを設計や施工に反映する情報化施工プログラム<sup>3)</sup>を地下研究施設建設開始前に策定し、現在運用中である。

情報化施工プログラムは、日常管理計測とステップ管理計測に大別される。計測結果の反映フロー図を図-2に示す。この中で、主として内空変位計測データおよび地中変位や覆工コンクリート応力等のステップ管理計測データの経時変化を分析することで、既設支保の健全性の監視ならびに地下空洞の長期安定性の評価を行う。

平成20年8月末までの日常管理計測ならびにステップ管理計測の実績図を図-3に示す。

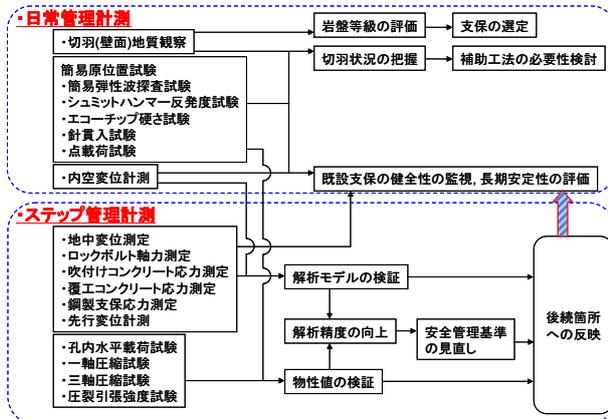


図-2 計測結果の反映フロー図

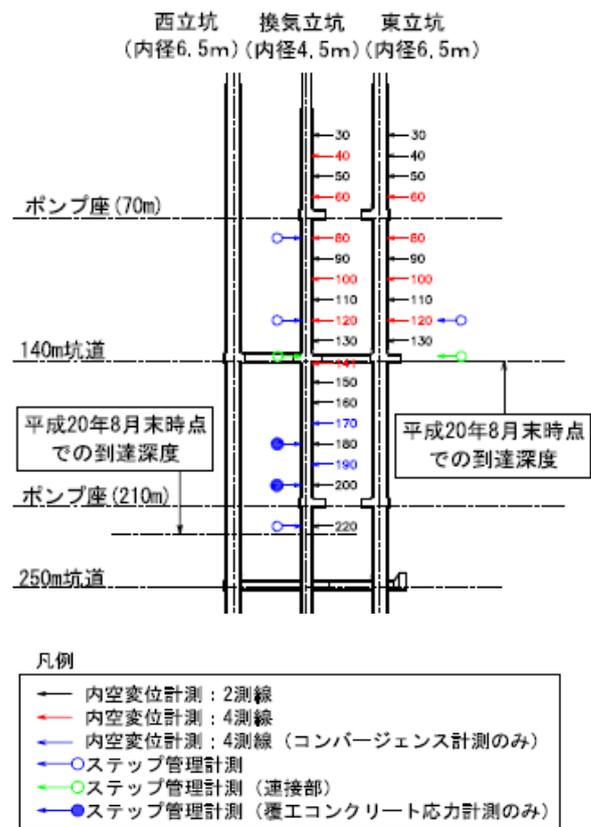
### (2) 内空変位計測

内空変位計測は、掘削後の空洞の変形を計測するため、コンバージェンス計測とレーザー計測による計測を実施した。内空変位計測位置図を図-4に示す（換気立坑は図-4(a)、東立坑は図-4(b)）。ただし、測線の位置は換気用の風管や給排水管の配置を避ける位置とした。図-3と図-4に示すように、立坑の深度に応じて2測線または4測線の内空変位計測を行う。立坑掘削後、計測ピンを設置し、初期値をコンバージェンスメジャーにて計測した。その後、掘削進行に伴う内空変位の変化を同様に計測した。覆工コンクリート打設後は、計測位置までのアクセスが困難であり、人力によるコンバージェンスメジャー

による計測が出来ないため、計測ピンの近傍に予め箱抜きをしておき、レーザー変位計（DIMETIX社製）を設置して内空変位を継続して計測した。

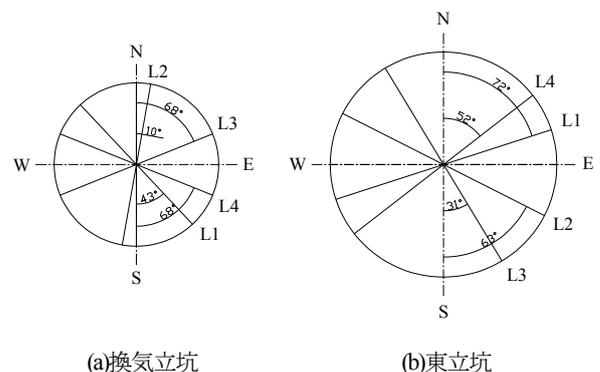
### (3) 覆工コンクリート応力計測

立坑掘削に伴い支保部材に発生する応力を計測するため、図-3に示したステップ管理計測深度にコンクリート有効応力計（東横エルメス社製）を覆工コンクリートに埋設し、埋設後の掘削に伴う掘削解放力等の外力が作用したときの応力を計測した。コンクリート有効応力計の配置図を図-5に示す。設計巻厚40cmに対して中立軸の位置となるように表面から半径方向の20cmの位置にコ



\*ただし、切羽地質観察は各切羽毎に実施し、簡易原位置試験は2m毎に実施している。

図-3 日常管理計測とステップ管理計測の実績図



(a)換気立坑

(b)東立坑

図-4 内空変位計測位置図

ンクリート打設前に計測器を45度毎に8箇所設置し、コンクリート打設直前を初期値として、計測を実施した。

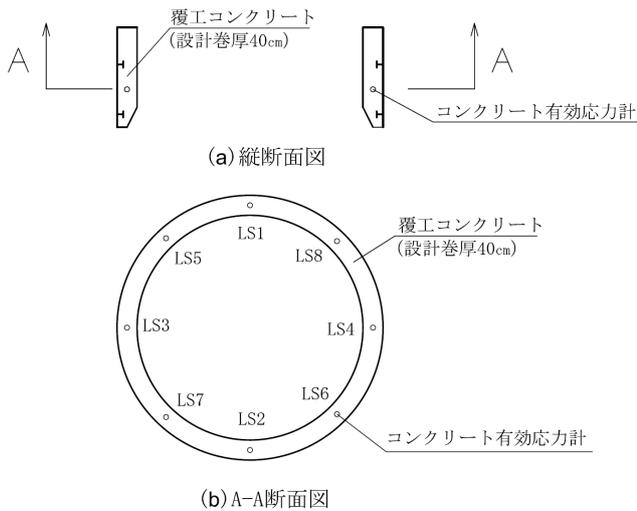


図-5 コンクリート有効応力計配置図

### 3. 計測結果

#### (1) 施工順序

地下研究施設の施工過程を図-6に示す。地下研究施設の掘削過程は次の3ステップとした。

- STEP1：計測器設置から立坑深度140mまでの掘削
- STEP2：深度140mの水平坑道の掘削。また、水平坑道の施工は、小型試錐座、東連絡坑道の順に実施。
- STEP3：立坑深度140m以深の掘削

#### (2) 内空変位

内空変位の経時変化図の一例として、換気立坑深度122.5mを図-7に、東立坑深度120.5mを図-8に示す。図中には、計測器設置位置からの掘削進行距離と覆工コンクリート施工の進行距離を追記している。ただし、内空変位の計測期間は、スカーフが計測器の設置断面を通過するまでの期間（掘削長として20m程度）である。

内空変位計測開始後、覆工コンクリート打設までに立坑掘削による掘削解放に伴う大きな変位が発生するが、覆工コンクリート打設後は変位が小さくなっている。これは、剛性の高い覆工コンクリートによって変形が抑制されるためである。なお、レーザー変位測定の見測精度は±2mmであり、コンバージェンスメジャーによる計測精度（±0.3mm）に比べ精度は低いものの、内空変位の傾向は捉えられていると考えられる。レーザー変位計に盛り替えた後は、1mm/日以下の変位量であり、掘削径（換気立坑5.6m、東立坑7.7m）の2倍程度の切羽離れで収束している。ここで、掘削径とは、コンバージェンスメジャーにより計測した掘削内径とした。

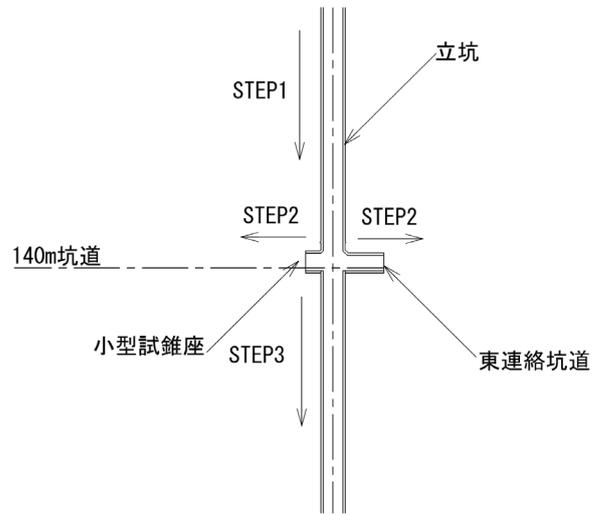


図-6 地下研究施設の施工過程

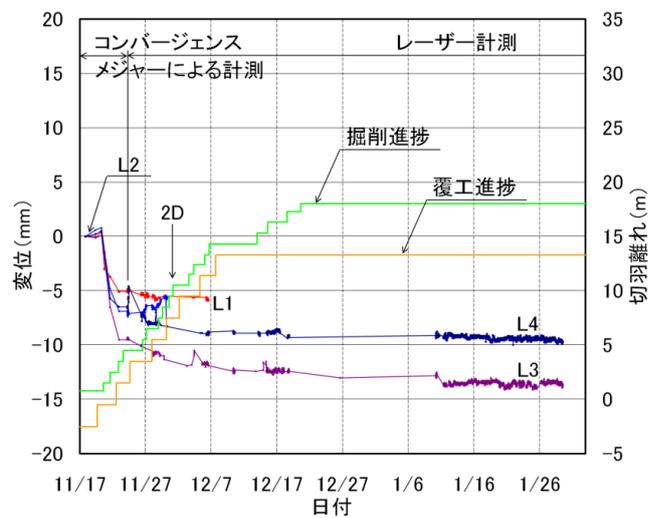


図-7 内空変位経時変化(換気立坑深度 122.5m)

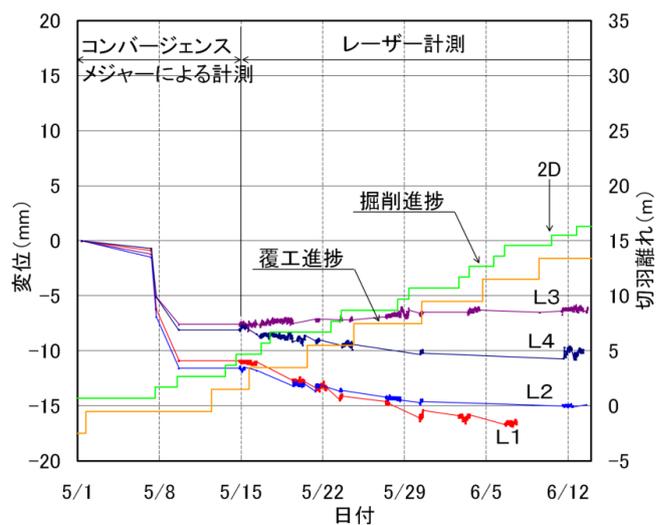


図-8 内空変位経時変化(東立坑深度 120.5m)

立坑工事は、1m 区間を 2 回掘削した後に 2m 分の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

により施工しているため、掘削直前から1回目の掘削に伴う内空変位から初期変形率を算出した。初期変形率は、次式(1)で表される<sup>4)</sup>。

$$dU/dL = \{\Delta D_l / (L_l - L_0)\} / D_0 \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $dU/dL(\%/m)$ は初期変形率、 $\Delta D_l(\text{mm})$ は1回目の掘削前に初期値を計測した後から2回目の掘削前までの内空変位、 $L_l(\text{m})$ は $\Delta D_l(\text{mm})$ を計測した時点での切羽と計測断面との距離、 $L_0(\text{m})$ は初期値を計測した時点における切羽と計測断面との距離、 $D_0(\text{mm})$ は初期測線長である。

### (3) 覆工コンクリート応力

覆工コンクリート応力の経時変化図の一例として、換気立坑深度121mならびに東立坑深度117.5mを図-9と図-10に示す。図中に示すLS1~LS4は、前述の図-5中のLS1~LS4の配置に対応している。図中には、コンクリート有効応力計設置位置からの掘削進行距離と覆工コンクリート施工の進行距離を追記している。また、縦軸の応力は圧縮側を正の値、引張側を負の値とした。

STEP1では、覆工コンクリート打設後、コンクリートの水和に伴い、覆工温度が上昇し、圧縮側に覆工コンクリート応力が変化する。その後、コンクリートの硬化に伴い、覆工温度が低下して、引張側に変化する。そして、次サイクル以降の掘削を経て、掘削解放力が作用し、圧縮側に変化すると仮定した。

換気立坑深度121mでは、図-9より打設後約15時間後に次サイクルの掘削を実施しているため、コンクリートが十分硬化していない状態で、次サイクル以降の掘削を行っていることから、覆工コンクリート応力が圧縮側に变化し続けている。これは、次サイクル以降の掘削による圧縮側の变化量がコンクリートの硬化に伴う引張側の变化量に比べて大きいことを示している。一方、東立坑深度117.5mにおいても、図-10より、換気立坑深度121mと同様に、打設後約19時間後に次サイクルの掘削を実施しているため、コンクリートが十分硬化していない状態で、次サイクルの掘削を行っているが、その後、長期休暇であったため、覆工コンクリートの硬化に伴い、コンクリート温度が低下して引張側に変化している。そして、その後の掘削に伴う掘削解放力が作用し、圧縮側に变化し続けている。また、掘削の進行に伴い、応力変化量が小さくなっていき、掘削径の3倍程度の切羽離れではほぼ安定する。

STEP2では、深度140m到達後、水平坑道の掘削により覆工コンクリート応力は変化している。水平坑道掘削終了時点で、覆工コンクリート応力が水平坑道掘削前に比べて、換気立坑では最大0.7MPa程度、東立坑では最大1.3MPa程度増加している。これらは、水平坑道との

深度方向の離隔(約20m)の影響を受けているものと考え

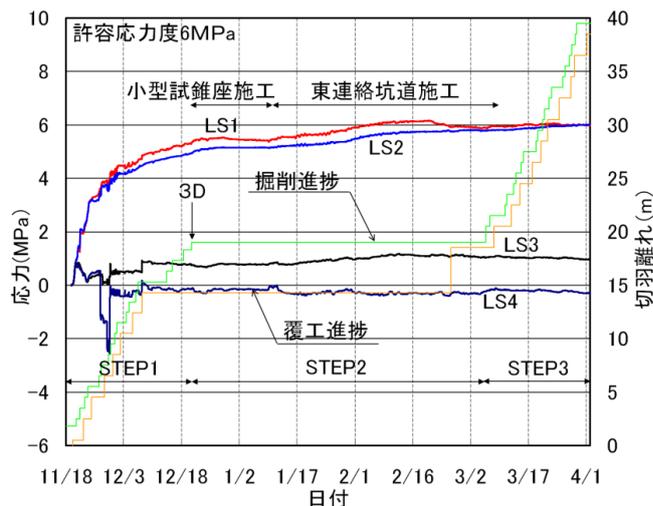


図-9 覆工コンクリート応力経時変化 (換気立坑深度 121.5m)

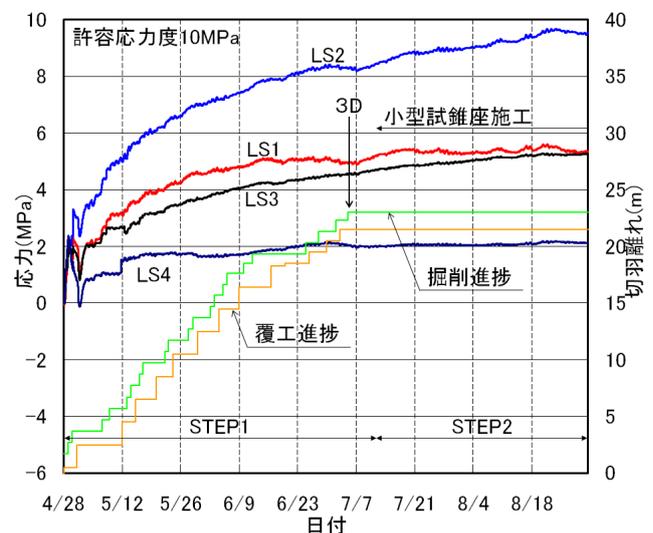


図-10 覆工コンクリート応力経時変化 (東立坑深度 117.5m)

えられる。STEP3では、換気立坑のみであるが立坑掘削の進行に伴う応力増加はほとんど見られない。

そして、換気立坑深度121mの覆工コンクリート応力の収束値は最大5.4MPaと許容応力度(6MPa)以内であるが、立坑掘削前に行った挙動予測解析値(4.7MPa)に対して1.2倍程度である。また、東立坑深度117.5mは、最大8.4MPaと許容応力度(10MPa)以内であるが、挙動予測解析値(7.1MPa)に対して1.2倍程度である。

## 4. 内空変位の初期変形率と覆工コンクリート応力の収束値の相関

### (1) 覆工コンクリート応力計測結果の整理

コンクリート有効応力計は、図-5より設計巻厚40cmに対して、中立軸の位置である覆工表面から20cmの位置に設置している。しかし、実際には立坑掘削の余掘り

に伴い、覆工巻厚が大きくなり、計測器の位置は中立軸より内側（立坑中心より）となる。このため、覆工コンクリート応力は、円周方向の軸力に加えて曲げの影響も計測している可能性がある。従って、内空変位の初期変位率と覆工コンクリート応力の収束値の評価を行う前に、以下の手順で覆工コンクリート応力の補正を行った。

まず、覆工中におけるコンクリート有効応力計の位置関係を図-11に示す。同図より、覆工巻厚の実測値に対する覆工表面からコンクリート有効応力計までの距離比を $\alpha$ とすれば、 $\alpha$ は次式(2)によって表される<sup>9)</sup>。

$$\alpha = r / (L_0 + L_1) \quad (2)$$

ここで、 $r$ は覆工表面からコンクリート有効応力計までの距離（20cm）、 $L_0$ は覆工巻厚の設計値（40cm）、 $L_1$ は余掘厚（cm）である。

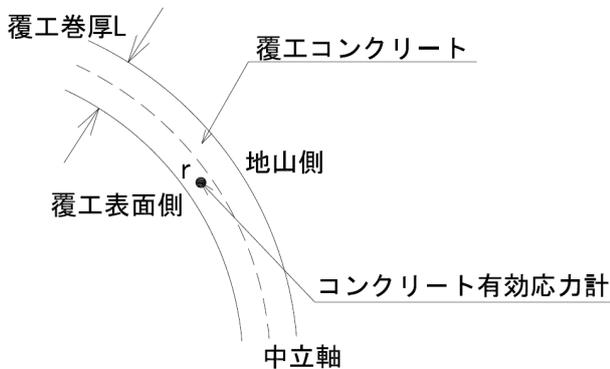


図-11 覆工中のコンクリート有効応力計の位置関係

次に、覆工表面からコンクリート有効応力計までの距離の変化による覆工コンクリート応力の変化の関係を三次元弾性解析により求めた。覆工表面からコンクリート有効応力計までの距離比 $\alpha$ と補正係数 $R$ の関係を図-12に示す<sup>9)</sup>。覆工巻厚の実測値より距離比 $\alpha$ を求め、図-12の関係により補正係数 $R$ を求めた。そして、計測した覆工コンクリート応力の収束値を補正係数により補正して、中立軸における覆工コンクリート応力の収束値を算出した。覆工コンクリート応力の収束値の補正式は、次式(3)で表される<sup>9)</sup>。

$$\sigma_2 = \sigma_1 / R \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_2$ は覆工の中立軸での応力の補正值（MPa）、 $\sigma_1$ は計測した覆工コンクリート応力の収束値（MPa）、 $R$ は補正係数とする。

以上の補正手順に基づき、覆工コンクリート応力の収束値を補正した結果を表-1に示す。ただし、支保設計では部材応力が長期許容応力度を超えないことを必要としていることから、覆工コンクリート応力の収束値は最大値とした。これまでの計測結果より、対象とした5断面（換気立坑は深度83.5m、深度121.5m、深度177.2m、深度199.3mの4断面、東立坑は深度117.5mの1断面）における

覆工コンクリート応力の収束値は挙動予測解析値以下の値であることから、地下空洞の安定性や支保部材の健全性が確保されている。

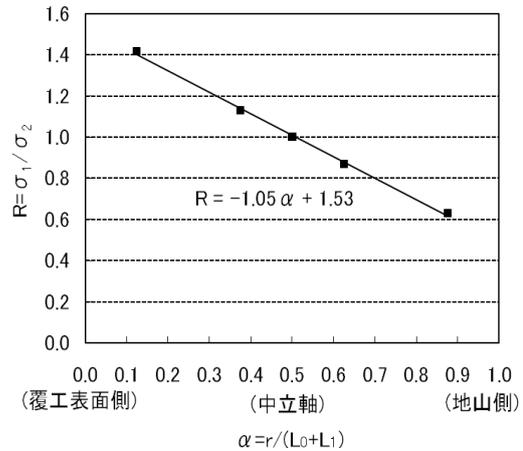


図-12 コンクリート有効応力計までの距離と補正係数の関係

表-1 覆工コンクリート応力の収束値の補正結果

立坑	深度 (m)	補正前 $\sigma_1$ (MPa) ①	補正係数 $R$ ②	補正後 $\sigma_2$ (MPa) ③=①/②	挙動予測 解析値 (MPa)
換気	83.5	2.0	1.2	1.7	2.7
	121.5	5.4	1.2	4.5	4.7
	177.2	4.5	1.1	4.1	6.0
	199.3	5.8	1.2	4.8	6.0
東	117.5	8.4	1.2	7.0	7.1

## (2) 内空変位の初期変形率と覆工コンクリート応力の収束値の相関

前節で整理した覆工コンクリート応力の収束値を補正した結果に基づき、内空変位の初期変形率と覆工コンクリート応力の収束値との関係を考察した。ここで、内空変位の初期変形率は表-1に示した覆工コンクリート応力の収束値 $\sigma_2$ の計測位置に該当する測線の値とした。例えば、換気立坑の覆工コンクリート応力の最大値が図-5のLS1とした場合は、内空変位の初期変形率は図-4の測線L2の計測結果を採用した。そして、覆工コンクリート応力には土被り圧の違いが含まれているため、覆工コンクリート応力の収束値を土被り圧（単位体積重量 $\gamma$ （ $\text{kN/m}^3$ ）と土被り厚さ $H$ （m）の積）で無次元化した値 $\sigma_2 / \gamma H$ として初期変形率 $dU/dL$ との関係を図-13に示す。その結果、両者の相関係数は0.9程度と相関性の高い直線関係となった。

## (3) 内空変位の初期変形率と覆工コンクリート応力の収束値の予測式の提案

図-13より内空変位の初期変形率と覆工コンクリート

応力の収束値の関係は、

$$\sigma_2 / \gamma H = 45.6 dU / dL \quad (4)$$

と求められた。この関係より、内空変位の初期変形率から覆工コンクリート応力の収束値の予測が可能であると考えられる。そして、初期変形率から覆工コンクリート応力の収束値を予測できると、施工における覆工コンクリート応力の管理基準値の設定や覆工コンクリートの設計基準強度の変更や吹付けコンクリートの追加のような支保部材の修正に反映できると考えられる。ただし、式(4)は、初期変形率 $dU/dL$ が0.1%/mの計測データに基づいた予測式である。したがって、今後は、立坑掘削の進捗に合わせて計測データを蓄積して予測式の精度を高めていく予定である。

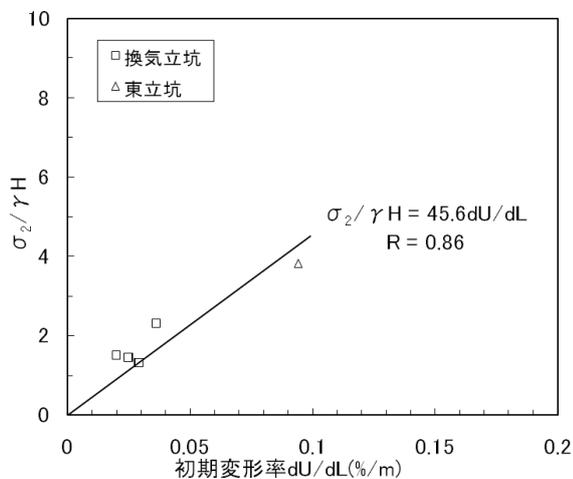


図-13 初期変形率と覆工コンクリート応力の収束値の関係

## 5. まとめ

幌延深地層研究計画における立坑掘削の内空変位の初

期変形率と覆工コンクリート応力の相関について考察して得られた知見を以下にまとめる。

- ・内空変位の初期変形率と計測断面の推定土被り圧で無次元化した覆工コンクリート応力の収束値とは相関性が高い。
- ・内空変位の初期変形率より覆工コンクリート応力の収束値の予測が可能である。そして、初期変形率から覆工コンクリート応力の収束値を予測できると、施工における覆工コンクリート応力の管理基準値の設定や覆工コンクリートの設計基準強度の変更や吹付けコンクリートの追加のような支保部材の修正に反映できる。今後も立坑掘削の進捗に合わせて計測データを取得していく計画であり、更に計測データを蓄積することにより予測精度を高めていくとともに、今後の設計・施工に反映していく予定である。

## 参考文献

- 1) 山田惇人, 山田文孝, 野村貢, 大西有三: 大深度山岳立坑における接続部の設計・計測と地山挙動, 土木学会, 土木学会論文集 No. 693/VI-53, pp. 61-72, 2001. 12.
- 2) 延藤遵, 福田和寛, 佐藤稔紀, 黒田英高: ショートステップ立坑の変形挙動に関する計測と解析, トンネル工学報告集, pp. 1-8, 2006. 11.
- 3) 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.
- 4) 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(CD-ROM), pp. 311-317, 2008.
- 5) 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(CD-ROM), pp. 305-310, 2008.

## CORRELATION BETWEEN INITIAL DEFORMATION RATIO OF CONVERGENCE AND LINING STRESS IN SHAFT EXCAVATION

Masanao YAMASAKI, Kimikazu TSUSAKA,  
Yoshihiro HATSUYAMA, Masashi MINAMIDE and Akihiro TAKAHASHI

JAEA (Japan Atomic Energy Agency) has been constructed the Underground Research Laboratory in Hokkaido. In the shaft excavation, convergence, lining stress, etc. are measured and analyzed in order to evaluate the validity of support design. In this report, correlation between initial deformation ratio of convergence and lining stress in the shaft excavation was discussed. Prediction equation of the lining stress from the initial deformation ratio of convergence was also proposed.