低強度・高地圧地山における 大深度立坑支保設計手法の研究

本島 貴之1*・小池 真史2・萩原 健司3・青柳 和平4

 ¹大成建設株式会社 原子力本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目25-1)
²大成建設株式会社 九州支店 (〒812-8518 福岡県福岡市博多区住吉四丁目1-27)
³大成建設株式会社 札幌支店 (〒060-0061 北海道札幌市中央区南1条西1丁目4番地)
⁴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 字北進432-2)
*E-mail: mtstky00@pub.taisei.co.jp

大深度立坑掘削の標準工法であるショートステップ工法は、地山を緩ませずに断面を確保できる優れた 工法である.ただし、国内に広く分布する堆積岩中への立坑構築を見据えた場合、特に低岩盤強度、初期 地圧の異方性、もしくは高地圧といった不利な条件がある場合には覆エコンクリート応力が過大となるこ とが想定される.本研究では支保への応力低減を目的としてショートステップ工法に二重支保・遅れ覆工 の考え方を導入し、同手法の成立性について三次元逐次掘削解析にて検討を行うことで有効性を確認した. 検証解析は(国研)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での原位置観測データを 利用し、深度とともに地圧が増加するのに対し、岩盤強度が横ばいとなる厳しい条件下で実施した.

Key Words : shaft excavation, double support design, short step sinking

1. はじめに

大深度立坑(例えば数百mの大深度)の掘削工事にお いては近年、ショートステップ工法が標準工法として適 用されている^{1,2)}.同工法は、1ステップ分の岩盤を掘削 した後に、即座に覆エコンクリートを打設して坑壁を支 保し、次のステップの掘削に移行する、というサイクル を繰り返す工法である.そのため、地山の開放応力が支 保に直接作用することから、水平方向の山岳トンネル掘 削に標準的に採用されるNATMと異なり、覆エコンクリ ートに大きな応力が発生する.

このショートステップ工法により,鉛直方向に掘り進 む立坑では,掘削に伴って地圧が大きくなるため,同時 に岩盤強度が高くならなければ,深度が深くなるに従っ て覆エコンクリートに作用する応力が大きくなる.その ため,掘削が進むほど,コンクリートや鋼材の高強度化, 部材断面の大型化が必要となる.このとき,部材強度に は限界があるため,断面を大きくする対応をとる場合が 多いが,断面が大きくなると作用する荷重も大きくなり,応力を低減するという効果が薄れてしまう.

荷重自体を低減するために従前には、NATMと同様に 吹付コンクリートとロックボルトで支保し、岩盤を変形 させつつ岩盤の耐力を最大限利用するNATMと同様の考 え方による掘削工法(ロングステップ工法は岩盤の変形の収 束を待って覆エコンクリートを打設する(鉛直上方向に 移動して覆エコンクリートを打設する)ため,鉛直上下 方向への掘削・覆工機械設備の移動に手間がかかる立坑 掘削では施工の時間ロスが多く,安全確保の面でも劣る ことから近年は採用が少ない.また,覆エコンクリート のような剛な構造を作らなければ,そもそも一定の内空 を確保することも難しい,すなわち断面確保しなければ 上下方向の掘削機械設備移動も困難となる,という理由 からもショートステップ工法が採用されている.

以上の背景より,覆エコンクリートに作用する応力の 低減が課題となっている.応力を低減する一案としては, NATMのように岩盤の変形が収束したのちに覆エコンク リートを打設する工法が考えられるが,施工効率および 断面確保の観点から採用が難しい.一方,従来のショー トステップ工法は,発生応力が大きいことを除けば,施 工効率,断面確保,および安全性などの観点からは優れ た工法であり,この利点を生かしつつ発生応力を低減さ せることが必要である.日本原子力研究開発機構幌延深 地層研究センターの立坑においても,圧縮応力が 30N/mm²程度まで発生している箇所があり、応力低減が 課題となっている.そこで本研究では、幌延をひとつの 事例としてショートステップ工法にNATMで適用されて いる二重支保・遅れ覆工の概念を取り入れた工法を導入 した場合を想定した三次元逐次掘削解析を行い、従来手 法との比較によって発生応力の低減効果の検証を行った.

ショートステップ工法への二重支保・遅れ覆工 の導入

(1) ショートステップ工法およびNATMの概要

ショートステップ工法(図-1参照)では基本として、 切羽離れが数mの段階,すなわち地山応力が解放されて いない状況で分厚く高強度なコンクリートを打設するた め、開放力を全て受け止める形となり、覆工コンクリー トに大きな応力が発生する.

水平の山岳トンネルで一般に採用されるNATMは,掘 削後早期に吹付けコンクリートやロックボルトを打設し, 地山の安定性を確保しつつ地山の変形を許容することで, 地山自体の耐力を行かして応力再配分による変形・応力 に耐える工法である.その後,地山の変形が収束した時 点で覆エコンクリートを打設するため,基本として覆エ コンクリートには大きな応力は発生しない.なお,吹付 けコンクリートには応力が発生するが,地山の変形を許 して地山耐力を活かした構造,すなわち地山自体が掘削 開放によって生じる応力を負担するため,ショートステ ップ工法のような掘削後すぐに剛な構造で変形を抑え込 む工法よりも発生応力は小さい.



図-1 一般的なショートステップ工法の施工順序の概要

(2) 二重支保・遅れ覆工の導入

NATMの場合にも土圧が大きい場合や地盤物性が悪い 場合には、吹付けコンクリートに大きな応力が発生し、 トンネルの安定が保たれないことがある.そのような状 況での対策方法の一つとして、二重支保工がある.一次 支保工である程度地山の変位を許してトンネル周辺の応 力を解放させ、その後二次支保を施工してトンネルを安 定させる工法である.このときに一次支保工には大きな 応力が発生するものの、設計思想上は仮設構造物である 一次支保は終局限界を超えても二次支保を打設するまで の間、破壊さえ起きていなければよい、という考えに基 づき限界まで一次支保を活用することが出来る工法とも 言える.

この二重支保の考え方を立坑掘削のショートステップ 工法に組み込むことで、覆工コンクリートへの応力発生 を低減させる.ただし、従来のロングステップ工法のよ うな掘削設備の上下移動を何度も行う工法では施工効率 が極端に悪くなる.そのため、掘削直後に1~2m分の一 次覆エコンクリートを打設して切羽掘削を進め、掘削開 放による応力を負担させるとともに地山の変形も許して 地山耐力も利用する.その後、次のステップの一次覆工 コンクリートを打設するのと同時に、前ステップで打設 した一次覆工の内側に二次覆エコンクリート(本設構造 物)を打設する(図-2参照).



このとき、型枠形状を工夫して、一次支保とーステッ プ前の二次支保を同時に打設することで施工サイクルも 通常のショートステップ工法と同じとすることで、従来 のNATM的なロングステップ工法よりも格段に経済的な 施工を実現できる.

切羽進行1~2m分で解放される応力(荷重)を一次覆 工に負わせて変形も許し、その分だけ低減した応力(荷 重)を本設である二次覆工に作用させる。わずか数m分 の掘削開放力の差であるものの、一般に切羽離れ数mの うちに数十%の掘削応力が解放されることから応力低減 効果は大きいと想定した。



*このイメージ図は今後の調査研究の結果次第で変わることがあります 図-3 幌延 URLの施設レイアウト



4. 幌延URLを事例とした検証解析

本研究で導入した二重支保・遅れ覆工工法の効果を確認するため、一般的なショートステップ工法と導入した工法を再現した三次元逐次掘削解析を実施した.三次元 逐次掘削解析にあたっては、JAEAが整備し運営している幌延深地層研究センター(以下,幌延URL)で取得された情報を使用し、幌延URLの一部である東立坑のGL-380mからGL-528mの掘削および支保構築を事例として 解析検討を行った.なお、数値解析には有限差分法解析 コードFLAC3D (ver.5.01)を使用した.

(1) 幌延URLの概要

幌延URLの鳥瞰図を図-3に示す. 幌延URLの地下研究施設は、東立坑、西立坑、および換気立坑の3本の立坑と深度140m、250m、および350mに位置する各立坑を連絡する水平坑道からなる地下構造物である. 立坑は坑口や連接部等の特殊部を除く全線をショートステップ工法で掘削している. 2018年9月現在において立坑の掘削深度は約GL-380mである. 地下施設周辺の地質は主としてGL-250m~-300m付近までは珪藻質泥岩からなる挿内層が分布しており、それ以深は珪質泥岩からなる稚内層が分布しており、それ以深は珪質泥岩からなる稚内層が分布している. ボーリングコアを用いた一軸圧縮試験による一軸圧縮強さは5MPa~25MPa程度の分布している. また初期地圧については後述するように異方性を有することが報告されている^{334等}.

3本の立坑のうち東立坑の標準支保パターンを図-4に 示す.鋼製支保工と覆工コンクリートからなる構成であ り、地山状況によりロックボルトを打設する区間もある.

立坑掘削に伴う支保や地山の挙動を把握することを目 的に計測Aおよび計測Bとして,内空変位,覆エコンク リート応力,ロックボルト軸力,鋼製支保工応力,およ び地中変位等の各種計測を実施している⁵.

幌延URLの立坑掘削時の支保挙動,地山挙動,および 亀裂を含む地山物性値の不均質性の影響に関する予測, 事後評価や再現解析について,種々の検討が実施されて いる^{0,7)}.その結果,初期地圧に異方性がある場合につ いても,三次元逐次掘削解析によって立坑掘削時の支保 や地山挙動がほぼ再現できることが確認されていること から,本研究においても三次元逐次掘削解析を採用した.

(2) 逐次掘削解析

幌延URLのうち,東立坑のGL-380mからGL-528mの掘 削を対象として三次元逐次掘削解析を実施した.以下, 解析モデル,物性値,および解析結果を取りまとめた.

a)解析モデル

三次元逐次掘削解析に使用した全体モデルを図-5 に, 切羽付近の拡大図を図-6 に示す.三次元逐次掘削解析 を行った深度はGL-380m~GL-528mとした.

本解析モデルでは、覆工コンクリート部分は厚さを反映したソリッド要素としてモデル化を行い、覆工継ぎ目境界部分の切欠き形状についてもをモデル化した.また 覆工コンクリートの厚さについては立坑掘削時の余掘り 実績に基づいて 60cm とした.

解析ステップは図-1 および図-2 に示した掘削ステッ プを再現し,掘削と覆エコンクリート打設を繰り返すよ う設定した.なお,解析ケースとして,一般的なショー トステップ工法を再現したケース1と本研究で導入した 二重支保・遅れ覆工を再現したケース2の2ケースを実 施し,本研究で導入した手法の効果を検証した.





図-6 解析モデル(ケース2) 切羽近傍拡大図

b)物性值

岩盤はMohr-Coulombの破壊規準に従う弾完全塑性体と し,解析に使用した物性値は幌延URL周辺での事前調査 ⁸⁰や実施設計⁹,および立坑掘削時の情報を加味し,想定 される岩盤物性値の下限に相当する値を設定した.弾性 係数,粘着力の設定値を図-7および図-8中の下限値とし て示す.内部摩擦角は声問層は15度,稚内層は25度とし, ポアソン比はそれぞれ0.164および0.186とした.

覆工コンクリートの強度については立坑掘削作業の実 績に基づき,覆工コンクリート打設から次ステップの打 設までの経過時間を考慮して設定した.設計基準強度 60N/mm2 に対し材令20hr時点において弾性係数を13GPa, 一軸圧縮強さを14.4MPaと設定した.

初期応力については、地上からのボーリング孔を利用 した試験、250mおよび350m坑道で実施した試験³、およ び350m水平坑道掘削時の内空変位計測結果⁴に基づく検 討を参考に、土被り厚相当の鉛直応力を1として、水平 面内の最大主応力を1.5(東西方向)、最小主応力を0.7 (南北方向)とした.



(3) 解析結果

-500

-550

10

三次元逐次掘削解析によって覆エコンクリートに作用 する応力を算出した. 覆エコンクリートに作用する応力 のうち,最大圧縮応力を抜き出し,深度方向に整理した 図を図-9 および図-10 に示す.

一般的なショートステップ工法を再現したケース 1, および本研究で導入したケース 2の両者ともに掘削深度 が深くなるにつれ,最大圧縮応力は大きくなる.両ケー ス共に GL-510m で圧縮応力は最大となり,ケース 1 で は約 38MPa であるのに対し,ケース 2 では約 28MPa と なっており,本研究で導入した手法を適用することによ り応力が凡そ 3/4 まで低減されていることを確認した.



最大 28.1MPa

20 30 40 50 覆エコンクリート応力 (MPa)

図-10 ケース2 最大圧縮応力の深度分布

また、ケース2について覆工コンクリートの応力分布 図を図-11 に示す.東西方向の地圧が卓越していること から、既往研究と同様に、1 ステップ分の覆工コンクリ ートの中で南北方向の下端部に最大圧縮応力が発生する ことを確認した.

4. 結論

本研究では、低強度で高地圧の地山に大深度立坑をシ ョートステップ工法で掘削する際に、覆工コンクリート に設計・施工上耐えることが出来ない過大な応力が発生 するという課題に対し、水平方向の山岳トンネルで適用 される二重支保・遅れ覆工を導入する工法を適用し、数 値解析によりその効果の検証を行った.

解析による検証結果,および従来のロングステップ工 法と呼称される工法と比較した本研究で導入した手法の 長所を以下に取りまとめる.



60

- 本研究で導入した立坑での二重支保・遅れ覆工を再 現した三次元逐次掘削解析を実施した.一般的なシ ョートステップ工法を再現した解析結果と比較した 結果,最大圧縮応力が凡そ3/4に低減されており, 提案する手法が応力低減に有効であることを確認し た.二重支保の特徴である,一次支保によってある 程度地山の変形を許容して応力を解放させることで 本設である二次支保に作用する応力を低減すること が出来た.
- 本研究の手法は一次支保と二次支保の打設間隔がわ ずかlm分の遅れに過ぎないが、既往の研究や実測 事例のとおり、切羽離れ数mのうちに数十%の掘削 応力が解放されることから応力低減効果が大きいこ とを確認した。
- 従来のロングステップ工法に比べると掘削および覆 工構築設備の上下移動を抑え、従来のショートステ ップ工法とほぼ同じ施工サイクルで施工を実現でき ることから、実施工への適用性が高い。

さらに、今後の展開として二重支保のみではなく、三 重、四重へと多重支保へ応用することで、より地圧等の 条件が厳しい地山に対応できる.また、一回の打設長の 調節や、一次の巻厚と二次の巻厚を調整することにより、 応力状態の最適化、すなわち経済設計が可能である.

また課題としては実施工への適用を通じて本手法の適 用性をさらに検証するとともに、実施工での計測結果を 反映した情報化施工への組み込みを図っていきたい.

謝辞:本論文は、大成建設とJAEAが共同研究として実施した「低強度・高地圧地山における大深度立坑支保設計手法の検討」の成果の一部を取りまとめて紹介したものである.様々な議論や意見交換により共同研究をより良いものに導いて頂いたJAEA関係各位、および三次元

逐次掘削解析作業の実務を担当した(株)地層科学研究 所の菅原健太郎氏に謝意を表します.

参考文献

- 土木学会トンネル工学委員会示方書改訂小委員会山岳 トンネル小委員会トンネルライブラリー(立坑・斜坑) 編集小委員会:山岳トンネルの立坑と斜坑,トンネ ル・ライブラリー第7号,土木学会,1994.
- 2) 櫻井春輔,清水則一,芥川真一,吉田秀典,佐藤稔紀, 山地宏志:国内超大深度立坑工事の地山崩壊形態から 見た崩壊発生機構に関する考察,土木学会論文集 F, 62 巻,4 号,pp.662-673,2006.
- 青柳和平,櫻井彰孝,丹生屋純夫:幌延深地層研究センターの250m大型試錐座(西)における初期地圧測定, JAEA-Data/Code 2015-012, 2015.
- 青柳和平,亀村勝美,菅原健太郎,萩原健司:坑道掘 削時の内空変位計測結果に基づく初期応力状態の推定, 第 53 回地盤工学研究発表会発表講演集,pp.11-12, 2018.
- 5) 山﨑雅直,山口雄大,舟木泰智,藤川大輔,津坂 仁 和:幌延深地層研究計画における水平坑道掘削時の計 測計画及び情報化施工プログラム, JAEA-Research 2008-068, 2008.
- 6) 坂井一雄、小池真史、青木智幸、山本卓也、稲垣大介、 山﨑雅直:三次元解析による立坑掘削時の覆工および 周辺岩盤の挙動分析、第 39 回岩盤力学に関するシン ポジウム講演集, pp.381-386, 2010.
- 7)津坂仁和,常盤哲也,稲垣大介,羽出山吉裕,小池真 史,井尻裕二:幌延深地層研究所におけるショートス テップ工法による立坑掘削に伴う岩盤の力学挙動に関 する研究,土木学会論文集 F1(トンネル工学), Vol.68, No.2, pp.40-54, 2012.
- 大野宏和,武田匡樹,松岡稔幸:深層ボーリング孔を 利用した地質学的調査および力学試験データ集 (HDB1~11孔), JAEA-Data/Code 2015-021, 2016.
- 9) 森岡宏之,山﨑雅直,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.

A STUDY ON SUPPORT DESIGN FOR DEEP SHAFT SINKING IN ROCK MASSES OF LOW STRENGTH AND ANISOTROPIC INITIAL STRESS

Takayuki MOTOSHIMA, Masashi KOIKE, Takeshi HAGIHARA and Kazuhei AOYAGI

The short step construction method is the standard construction method for deep shaft excavation. However, considering the shaft construction in the sedimentary rock widely distributed in Japan, the support concrete stress can become excessive especially when there are bad conditions such as low rock strength, anisotropic initial stress, or high ground pressure. In this research, we introduced the dual support design to the short step construction method in order to reduce the support stress, and confirmed the validity by three dimensional numerical analysis. Validation analysis was conducted using the in-situ data in the Horonobe Underground Research Project conducted by Japan Atomic Energy Agency.