# 堆積軟岩における大深度立坑掘削に伴う 壁面崩落およびその対策について

萩原 健司1・南出 賢司1・名合 牧人1・三浦 養一2・稲垣 大介3

<sup>1</sup>正会員 大成建設株式会社 幌延地下施設工事作業所 (〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2) E-mail:hagi@ce.taisei.co.jp

<sup>2</sup>幌延ジオフロンティアPFI株式会社(〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2)

3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 (〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2)

本報告では、堆積軟岩中に大深度立坑を掘削する際に発生した壁面崩落およびその対策について報告す る. 立坑掘削中に発生した崩落は、断層の影響によるものと、立坑掘削に起因する応力再配分に伴う応力 集中によって発生した崩落によるものであった。崩落は、地山を抉るように発生し、崩落箇所の上部既設 覆エコンクリートの背面地山が崩落する高抜け現象を誘発する可能性があり対策が必要であった. そこで、 ロックボルトや覆工長の短縮の対策工を講じて、地山の崩落を減少させることで高抜け現象を抑制するこ とができた.

Key Words : soft sedimentary rock, shaft sinking, spalling, fracture distribution

#### 1. 序論

独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下,原子力 機構という)は、堆積岩を対象とした高レベル放射性廃 棄物の地層処分技術の信頼性向上を目的として、北海道 天塩郡幌延町にて、幌延深地層研究計画を実施している. 掘削対象となる岩盤は、新第三紀堆積岩であり、深度約 250m までが珪藻質泥岩からなる声問層、それ以深が珪 質泥岩からなる稚内層である.

本計画は平成 13 年 3 月より開始されており,平成 25 年 8 月までに,換気立坑,東立坑および西立坑を深度 350m まで,深度 140m および深度 250m の調査坑道の掘 削を完了し,深度 350 m の調査坑道は総延長約 750m の うち,約 600m の掘削を完了している.

本サイトにおける特徴的な施工条件の一つは, 掘削対 象となる岩盤の平均的な一軸圧縮強さが約 25MPa 以下 と小さいのに対して, 深度 300m 以上の高土被りとなり, 地山強度比が小さいことである.また, 稚内層には, 高 透水性の断層等が事前のボーリングで確認されている. このため, 筆者らは, 事前に実施した調査ボーリングや プレグラウト工のボーリングコアによって取得した断層 の情報や, 3 立坑の中で先行して掘削した換気立坑の情 報を基に, 事前に予測されるリスクに対して解析的検討 を行い, 最適な設計を準備しておくと共に, 施工に際し ては適切に管理基準値を見直しながら、支保設計へ反映 させる情報化施工を実施している.

本稿は、この3立坑の中で先行して掘削した換気立坑 において発生した崩落事象に対する支保設計および対策 工の検討について、報告する.



図-1 幌延深地層研究センターレイアウト

### 2. 立坑掘削とプレグラウトエ

#### (1) 立坑掘削

幌延深地層研究センターの立坑は、ショートステップ 工法を採用している.支保部材は、覆エコンクリート、 鋼製リング支保工(以下,鋼製支保工という),ロック ボルトを採用している.各立坑の掘削方式,支保部材の 仕様等を表-1に示す.

幌延深地層研究センターの立坑掘削で採用したショー トステップ工法の施工手順は、図-2に示す4つの段階からなる(各段の工程を赤で示す).初期状態を底盤から 高さ約 lmまで覆エコンクリートが構築された状態(図-2(a)とすると、始めに、lm掘削した後、鋼製支保工を 所定の位置に建て込み、ロックボルトを施工する(図-2(b).次に、lm掘削して、同様の工程を繰り返す(図 -2(c)).その後、底盤から約 lmを残して鋼製の移動型 枠を設置し、覆エコンクリートを構築する(図-2(d)). 覆エコンクリートを構築することによって鋼製支保工も 支保として機能する.

#### (2) プレグラウトエを利用した断層確認

原子力機構は、平成 18 年 1 月に北るもい漁業協同組

<b>衣-1</b> 立功掘削方式・文保制材						
項目		換気立坑	東立坑	西立坑		
掘削工法		ショートステップ工法				
掘削方式		機械掘削※	発破掘削			
覆エコン クリート	強度	24~60N/mm <sup>2</sup>				
	巻厚	400~500mm				
	鉄筋	無筋				
鋼製 支保工	規格	SS400, HT590				
		125H, 150H, 154H				
	分割数	1リングあたり4~6				
ロック ボルト	耐力	TD24(耐力176.5kN)				
	定着	モルタル全面定着				
	長さ	2.0~4.0m	3.0~	4.0m		

※機械掘削はロードヘッダーによる



図-2 立坑の施工手順<sup>1)</sup>. (a)初期状態,(b)第1掘削段階, (c)第2掘削段階,(d)覆工コンクリートの構築 合と締結した「幌延深地層研究所の放流水に関する協定 書」に基づいて、幌延深地層研究所からの排水量を 750m<sup>3</sup>/day 以下としている.これを踏まえて、事前に調 査したボーリングにより取得した透水係数<sup>2)</sup>を用いて群 井を考慮した井戸式により湧水量を算定すると、定常湧 水量が4,000m<sup>3</sup>/day を超えることが試算された.このた め、750m<sup>3</sup>/day の排水量制限に対して、坑内給水量等を 150m<sup>3</sup>/day に設定して決定した湧水量600m<sup>3</sup>/day 以下にな るように目標ルジオン値を0.1Lu に設定したプレグラウ トを実施する必要があった.

そこで、深度 250m 以深の掘削前に、深度 250m の立 坑底盤から超微粒子セメントを用いたプレグラウトを実 施した.このプレグラウトは、パイロット孔およびチェ ック孔をオールコアボーリングで計画しているため、事 前に把握した断層の位置の再確認や未確認の断層情報の 有無の確認も併せて実施した.図-3 に換気立坑における プレグラウトの孔配置図および想定改良範囲を示す.ま た、図4にプレグラウトの注入結果と断層位置を併せて 示す.同図より、断層近傍で注入量が多くなっているこ とが分かる.また、弾性波反射法の調査結果とも断層の 位置は概ね一致した.すなわち、立坑の設計検討を行う 際、断層の位置の把握が重要となるが、このことから、 注入結果等から断層の位置情報の精度を向上させる可能 性が示唆される.



図-3 換気立坑プレグラウト配孔図と想定改良範囲図"

# 3. 地山の崩落および覆エコンクリートの水平ク ラックの発生

#### (1) 崩落の発生

本立坑は、覆工コンクリート1スパンの掘削毎に割れ 目観察、3次元レーザースキャナー等の計測(以下、壁 面観察という)を詳細に実施している.換気立坑深度 250m以深の掘削時の壁面観察において、事前に予測し た断層位置等の地山情報と概ね一致する位置および走 向・傾斜で断層が確認された.この断層にはグラウト材 も確認されており、湧水の抑制は達成されていたものの、 設計掘削仕上り面より 0.4m~1.2m 程度の奥行の崩落が 発生した.

また,深度 274~276m では南北方向(初期地圧の水平 面内最小主応力方向)においても地山の崩落を確認した

(図-5).この範囲は、ブレイクアウト現象によるもの と判断した.ここでブレイクアウト現象とは、図-6に示 すように、地山の初期地圧の異方性により、掘削面が東 西方向に押し出され南北の坑壁において円周方向の応力 集中が発生した結果、南北の坑壁面で崩落を発生させる 現象である.

また,深度 284m~287m の北東方向で発生した崩落は, 切羽直上の既設覆エコンクリート下端から地山を抉るよ うにオーバーハング形状で発生しており,既設覆エコン クリート背面地山が崩落する高抜け現象を誘発する可能 性があった.また,このオーバーハング形状の崩落が発 生した地山の直上の覆エコンクリートには,長さ 4m, 幅 1mm程度の水平クラックが発生した.



図中のF記号は断層を表す 図4 プレグラウト結果<sup>3)</sup>

#### (2) 解析による原因の特定

地山の崩落と覆エコンクリートの水平クラックの因果 関係を調べるため,2次元軸対象解析を実施した.

この解析は、初期地圧の水平面内最小主応力方向であ る南北方向において、地山の崩落深さによって、崩落箇 所直上の覆エコンクリートの応力状態の変化を確認する ことで、地山の崩落と覆エコンクリートに発生した水平 クラックの因果関係を特定することが目的である.

解析条件として,解析領域は,検討対象である覆工コ ンクリート(深度 282m~284m)の上方を 5D(D:掘削 径 5.5m≒6.0m)程度,下方は深度 287mから 3D程度, 側方向は立坑壁面より 5D程度を確保して,鉛直方向 54m,水平方向 32.8mとし,立坑中心を対称軸とした 1/2



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100110 120 130 cm 図-5 地質観察結果および壁面凹凸図<sup>4)</sup>



図-6 ブレイクアウト現象模式図4

平面領域とした(図-7).上下境界は鉛直方向固定,側 方境界は水平方向固定とした.初期応力の異方性は,鉛 直方向:周方向:半径方向=1.0:1.3:0.9とした.岩盤 および覆エコンクリート(設計基準強度 60N/mm<sup>2</sup>;材齢 23時間)の解析用物性値は,既往の試験結果に基づい て,表-2および図-8のように設定した.岩盤は弾性体で モデル化し,覆エコンクリートには,引張破壊を考慮し て引張強度以上の応力を受け持たない条件を,覆エコン クリート背面と岩盤は不連続としてその間にインターフ ェース要素を入れた条件を考慮した.

この結果を崩落深さ毎に3段階に分けて図9に示す. 崩落深さが 0.3m では,覆エコンクリート地山側に引張 応力が発生するが,崩落深さがオーバーハング形状とな る崩落深さ 1.4m では覆エコンクリート内空側表面付近 まで引張応力が発生し、高抜け現象の兆候が認められた 際には、覆エコンクリート応力がほぼ引張応力の状態と なる. すなわち、地山の崩落が大きくなると、覆エコン クリート内に生じる引張応力が大きくなり、特に、高抜 け現象の兆候が認められた際に、覆エコンクリート内空 側表面にまで引張応力が生じることが分かった. この解 析結果より、覆エコンクリートの水平クラックは、覆エ コンクリートが高抜け現象を抑制している結果と考えら れる. したがって、高抜け現象の抑制にはショートステ ップ工法は効果的であると同時に、この崩落を低減させ ることが覆エコンクリートの健全性を確保するために重 要であると考えられる.





(b) GL-2 図-7 2次元軸対象解析メッシュ



**表−2**物性値<sup>5)</sup>

対象	パラメータ	設定値	
山舟	弹性係数	500MPa	
石盈	ポアソン比	0.186	
	弹性係数	13,800N/mm <sup>2</sup>	
覆工	ポアソン比	0.2	
コンクリート	単位体積重量	23kN/m <sup>3</sup>	
	引張強度	$1.8 \mathrm{N/mm^2}$	



表-3に示す通り、対策工の比較検討を行った. 吹付コ ンクリート案は、他の対策工と比較して、経済性、工程 への影響が大きいため不採用とした. 増しロックボルト 案は、半径方向外向きの拘束力を地山に与え、地山を三 軸状態にして地山の応力状態を改善させる案である.ブ レイクアウト現象には効果的であると考えたが、プレグ ラウトを実施した断層区間においては、穿孔した孔が水 みちとなり、坑内に多量の湧水を流入させてしまう可能 性や被圧した地下水が噴発し、作業の安全性が著しく低 下する可能性がある. そのため、断層区間以外において 実施することとした. 覆工長の短縮案は、通常2m(無 支保区間最大 3m) である掘削長を 1m (無支保区間最大 2m)として、1mの掘削と1mの覆工打設を繰り返す方 法である. この対策工は、地山の裸坑状態での時間を短 縮するとともに、掘削影響範囲を小さくする効果を期待 したものである. 但し、lm覆工に変更することで岩盤 の安定性は改善される一方、原設計より早期に覆エコン クリートを打設するため、覆エコンクリートに発生する 応力の最大値および発生モードの変化を確認、予測する 必要があった.そこで、3次元FEM解析を行って、覆 工の健全性を評価し、2m覆工と比較して覆エコンクリ ート内に生じる応力が小さいことを解析によって確認す ることができ、実施することとした.

ここで、この2種類の補強工の採用基準を定めた. 覆 工長の短縮については、図-5に示す施工実績より、崩落 深さが 80cm程度においては覆工コンクリートが健全で あること、崩落深さが 110cm以上となった時点で、覆工 コンクリートに水平クラックが発生したことを踏まえ、 崩落深さが 80cm以上になった時に覆工長を短縮するこ ととした.

また,増しロックボルトの施工については,崩落深さ を 80cm 以下にすることを目的に経済性や工程を考慮し, 崩落深さが 50cm 以上となった際に,断層区間以外で実 施することとした. これらの適用基準に基づき,換気立坑は,A計測やB 計測(覆工応力計)により,覆工コンクリートの健全性 を確認しながら施工を行った結果,増しロックボルト区 間および覆工長の短縮区間とも覆工コンクリートの健全 性が確認された.また.後続の東立坑および西立坑につ いては,プレグラウトのコアボーリングによって,掘削 前に取得した断層等の情報により,覆工長の短縮区間を 事前に決定し,増しロックボルトを併用しながら経済的 に覆工コンクリートの健全性を確保した.

#### 5. 結論

本稿では、幌延深地層研究計画で実施した換気立坑の 支保設計および対策工を検討するとともに、換気立坑に おいて発生した崩落事象に対する対策工を立案し、実施 した. その結果、以下の知見が得られた.

・堆積軟岩で大深度立坑の計画を行う場合,断層だけで なく,地山の異方性も考慮して地山の崩落発生位置を予 測することが重要である.

・高抜け現象の対策としてショートステップ工法が効果 的であるが、過度な崩落は、覆エコンクリートに引張応 力を発生させ、覆エコンクリートの健全性に影響を及ぼ す場合がある.

・高抜け現象を誘発する地山崩落の対策工として、ロックボルトおよび覆工長の短縮が効果的である.

これらの対策工は、地山の崩落を許容して実施する対 策工である.今後は、さらなる崩落深さの抑制が可能な 経済性および工程への影響が少ない効果的な対策工につ いて、検討を行う.また、2次元軸対象解析により崩落 の検討を行ったが、今後は、3次元解析を行い、詳細に 検討を行うことにより、覆工コンクリートへの影響を定 量的に把握し、崩落およびこれに伴う覆工応力への影響 を予測可能な設計手法を構築する必要がある.

対策案	吹付コンクリート案	増しロックボルト案	覆エ長の短縮案(2m→1m)
瓶亜	・厚さ10㎝の吹付コンクリートを追加	・深度1m毎に崩落範囲に@1m程度で打設	・1掘削長を1mとして、1m掘削と1m覆工を繰り返す
佩女	・吹付機械を毎回地上から搬入	・1ブーム削岩機を毎回地上から搬入	・新たな設備は不要
	・岩盤の安定性に効果的である	・ブレイクアウト現象には効果的であると考えられる	・岩盤の安定性に効果的である
品質・ 確実性		・破砕帯中に施工したロックボルトは湧水に伴い破 砕部が土砂状に流出し効果が発現されない	
工程	通常サイクル+25%	通常サイクル+10%	通常サイクル+15%
経済性	+30%	+8%	+10%
施工性	・施工可能であるが,研究項目である岩盤観察範 囲に吹付が付着してしまう	・長さ3mまでは施工可能だが、穿孔した孔から被圧 した地下水が噴出する可能性がある	・覆エ用移動式鋼製型枠は1m覆工にも対応済であ り、新規設備等は不要である
安全性 その他	・初期強度不足が懸念される (吹付厚の解析的検討が必要)	<ul> <li>・破砕帯の流出対策が別途必要</li> <li>(吹付併用の検討が必要)</li> </ul>	・覆工応力の算出、計測が必要
40 A == (==	×	0	0
総合評価	工程,経済性で覆工長短縮案より劣る	プレグラウトエ施エ範囲での採用は困難	効果が高いがロックボルト案より、工程・経済性が劣る

表-3 対策工の比較検討

#### 参考文献

- 津坂 仁和,稲垣 大介,名合 牧人,松原 誠: 堆積軟岩における大深度立坑掘削に伴う壁面崩落現 象,地下空間シンポジウム論文・報告集,第 17 回, pp.155-162,2011.
- Tsusaka, K., Inagaki, D., Tokiwa, T., Yokota, H., Nago, M., Matsubara, M., Shigehiro, M.: An Observational Construction Management in the Horonobe Underground Research Laboratory Project, Proceedings of the WTC 2012. (CD-ROM), Bangkok, Thailand, 20-23 May 2012.
- 南出 賢司,萩原 健司,名合 牧人,小川 弘之, 宇山 幹紀,傳馬 啓輔,木須 芳男,森本 勤, 工藤 元,津坂 仁和:堆積軟岩における大深度立 坑掘削時の崩落対策工の効果,第 67 回年次学術講演会 講演概要集,III-070, pp.139-140, 2012.
- 5) 稲垣 大介,津坂 仁和,青柳 和平,井尻 裕二, 小池 真史,名合 牧人,亀村 勝美,菅原 健太 郎:幌延深地層研究施設の立坑覆工に発生した水平 クラックの発生メカニズムに関する一考察,第68回 年次学術講演会講演概要集,III-289, pp.577-578, 2013.

(2013.9.2 受付)

## COUNTERMEASURES AGAINST COLLAPSE IN SHAFT SINKING AT GREAT DEPTH IN SOFT SEDIMENTARY ROCK

# Takeshi HAGIHARA, Masashi MINAMIDE, Makito NAGO, Yoichi MIURA and Daisuke INAGAKI

This paper discusses spalling of excavation walls observed during deep shaft sinking through soft sedimentary rocks, and countermeasures against it. The rock spalling during shaft sinking were mainly attributed to fault slip and stress concentration caused by redistribution of in-situ stress as a result of the excavation. The excavation-induced spalling extended deep in the excavation walls, suggesting a potential for collapse of wall rock behind the freshly installed concrete lining right above the spalling area. Therefore, by designing the rockbolt pattern and shortening the lining span optimal to minimize spalling, excavation walls were effectively prevented from spalling and thus from collapsing.