

レイズボーリング工法による世界最大クラスの斜坑掘削

THE LARGEST INCLINED SHAFT CONSTRUCTION BY RAISE BORING METHOD

小野 武美¹⁾・大野 雅之²⁾・村上 荘二³⁾・高塚 正彦⁴⁾・南條 忠文⁵⁾
Takemi ONO, Masayuki OHNO, Syoji MURAKAMI, Masahiko TAKATSUKA and Tadafumi NANJO

We applied Raise Boring Method for inclined shaft which is 4.74m-diameter, 340m-long and 70degrees inclined in Bukou mine. It was first time that RHINO 2006DC, large raise boring machine made by Tamrock Finland, was used in Japan and this is the world's largest class raise boring project in inclined shafts,

We have broken through it with only 0.5% error in spite of some troubles that was caused by geological condition, very cracked limestone. We have overcome these troubles by some new technologies, for example memory type direction and inclination measurement system, excavation management system, solid stabilizer and so on.

This experience suggest us a spread of possibility of Raise Boring Method.

Key Words: raise borer, raise boring method, shaft, tunnel, mine, incline, limestone

1. はじめに

今日、施工現場の無人化・省力化を目的とした技術開発は、建設労働力の高齢化などの問題を社会背景に、非常に重要な課題となっている。こうした背景を踏まえ、武甲鉾山新設斜坑工事においても現有技術にとらわれない新技術の検討を行ない、安全で省力化が期待できる最新鋭の掘削機を使用したレイズボーリング工法を採用した。

本工事は、斜坑掘削では世界最大クラスとなる、大口径・大深度レイズボーリング工法であるが、掘削精度0.5%という非常に高い精度で貫通させることができた。

本文は、本工事の施工過程等について報告するものである。

2. 工事概要

武甲鉾山では、山頂で採掘した石灰岩を山頂斜坑(直径5.0m、延長480m)に投入し、坑底で引き抜いてベルト・コンベアーで貯鉱場に運搬している。しかし近い将来、山頂のベンチダウンに伴なって従来の山頂斜坑が使用できなくなるため、これに替わる新しい斜坑を新設するものである。

新斜坑は直径4.74m、延長340m、傾斜角70度で構

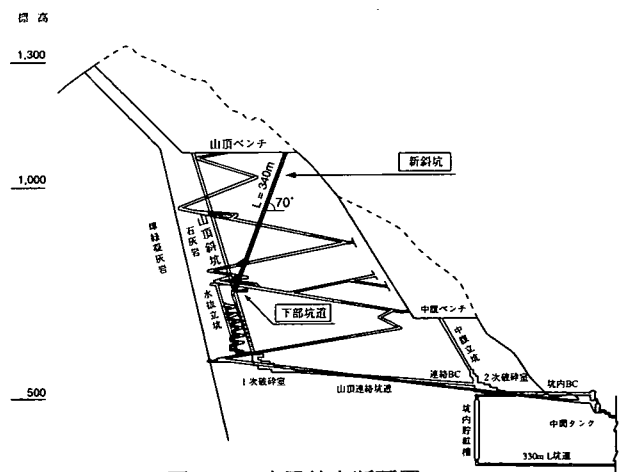


図-1 武甲鉾山断面図

- 1) 武甲鉾業 (株) 武甲鉾業所 所長
- 2) 武甲鉾業 (株) 武甲鉾業所 副所長
- 3) 武甲鉾業 (株) 技術部長
(前 佐藤工業 (株) 関東支店 工事部長)

- 4) 佐藤工業 (株) 関東支店
- 5) 佐藤工業 (株) 土木本部技術部

築し、既存の補助斜坑に接続して使用される。(図－１ 参照)

本工事の特徴は次のとおりである。

- ・レイズボーリング工法による、我が国最大・最長の大口径斜坑工事である。
- ・70度の傾斜掘削で、鉛直掘削に比べはるかに施工難度が高い。
- ・地質は透水性の高い亀裂性岩盤（石灰岩）である。
- ・当工事で導入するフィンランド・タムロック社のレイズボーラー（RHINO 2006DC）は、我が国最大である。

2. 1 レイズボーリングマシンの選定

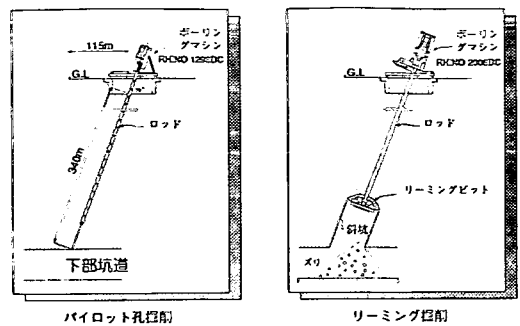
レイズボーリング工法は、地表または上部坑道にレイズボーリングマシンを設置し、目的の下部坑道に向けて約300mm程度のパイロット孔を貫通させた後、下部坑道でパイロットビットをはずして大口径のリーマーを取り付け、今度はそれを回転させながら上向きに引き上げてパイロット孔を所定の大きさに拡幅する工法である。リーミングで掘削されたずりは下部坑道に自然落下し、下部坑道より搬出される。(図－2 参照)

これまで我が国で使用された最大のレイズボーラーは、タムロック社の RHINO 1298DC で、1994 年以來 3 本の立坑掘削に供用されている。しかし本機を本工事に採用するにはその能力から見て危険率が高いと判断し、1ランクアップした RHINO 2006DC の採用を決定した。(図－3 参照) ただし、同機は注文生産で1年を要するため、工期の関係からパイロット孔は RHINO 1298DC 機で掘削し、RHINO 2006DC の搬入を待ってリーミング掘削に使用した。

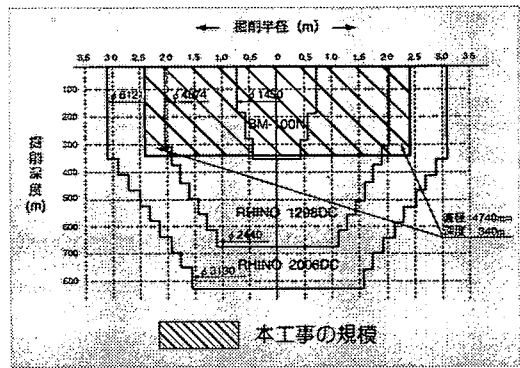
表－1 にレイズボーラーの比較を示すが、これまで国内で多く使用されてきた機械（ビックマン BM-100N）と比較すると、掘削性能値であるトルク、スラストは約5倍となっており、我が国で初めて使用される最大の大型レイズボーラーである。

この機械は従来の機械と比較して次のような特別仕様で製作されている。

- ・専用クローラーにマシンを搭載することができるため、現場への搬入・移動が容易である。
- ・現場での機械のセッティングに特殊なリフティング装置やホイストは必要なく、トランスポートーション装置により、マシン自身で正確なセットができる。



図－2 レイズボーリング工法



図－3 レイズボーラーの適用範囲

表－1 レイズボーラー性能比較表

掘削機形式	BM-100N	RHINO 1298DC	RHINO 2006DC
最大寸法	1,640W x 4,540L x 4,365H	1,800W x 3,200L x 5,380H	2,223W x 2,600L x 5,408H
掘削機本体重量	12,500 kg	18,700 kg	24,100 kg
本体動力	90 kW	450 kW	500 kW
ドリルロッド	φ 203 x 1,000 mm	φ 286 x 1,500 mm	φ 327 x 1,500 mm
パイロット孔径	250 mm	311 mm	349/381 mm
リーミング孔径 (mm)	850/1150/1450	1524/1829/2134/2440/2749/3058/3412/3720/4074	3130/3824/4143/4442/4746/5105/5458/5767/6121
トルク	6.7 t-m	31.0 t-m	46.1 t-m
スラスト	160 t	405 t	692 t
掘削深度	φ 850: 350m	φ 2,440: 680m	φ 3,130: 850m
備考：掘削孔径と深度の目安は、対象岩盤の一軸圧縮強度を75MPa程度、岩盤は肌落ち等がなく、安定した状況と想定している。			

- ・ドリルロッドのネジ部は、強力なトルク下で苛酷な使用に耐えるために、DI22と呼ばれる特殊ネジを使用している。
- ・マシンはコンピュータ化されており、回転数とビット荷重を一定値にセットすると、掘削中の抵抗値を読み取り、設定範囲内で自動掘進を行なうことができる。設定値を超過する場合には、コンピューター指令により停止し、元位置までストロークを戻し、指示待ち状態にセットできる。

3. 施工実績

3. 1 パイロット工

前述のように、パイロット孔掘削にはRHINO 1298DCを使用し、泥水循環方式で掘削を開始した。

掘削経過は、当初より逸泥が激しく、セメンテーション（セメントミルクおよびモルタル）を行いながら150mほど掘進したが、掘削精度の管理基準値1.0%以内の確保が困難と判断し、再掘削を行なった。

新孔での掘削も逸泥が激しく、セメンテーションをはじめ各種の逸泥対策を施したが、掘削精度は0.5%という高精度で貫通させることができた。

パイロット孔貫通後、ボアホールカメラで孔壁調査を実施して、リーミング掘削時のトルク、スラスト管理データとした。

(1) 掘削精度管理

レイズボーリング工法の施工におけるパイロット工の精度管理は、設計位置に目的の坑道を施工するのみならず、リーミング工の際のガイドウエイとしても重要な役割を果たす。

特に、斜坑の場合は、重力的作用によってノーズダウン現象が発生し、鉛直方向への孔曲りの原因となる。また、回転方向にロッドが引っ張られるため、水平方向の孔曲りの原因となる。そのため、斜坑掘削における孔曲りは3次的に発生しており、立坑に比べ、はるかに掘削精度管理は難しいといえる。

こうした状況において、掘削精度を所定の範囲内に確保するために、以下の対策を実施した。

1) 独自の掘削管理システムの開発

「メモリー型方位・傾斜計測システム」と「掘削管理・制御システム」からなる独自の掘削管理システムを開発することにより、掘削方向制御を行なった。(図-4)

「メモリー型方位・傾斜計測システム」は、方位センサーと傾斜センサーを内蔵した測定器を掘削先端部付近の非磁性ロッド内にセットして掘削位置を正確に検知するシステムである。バッテリーとメモリーを装備しているため、連続しての測定が可能となっている。

従来一般的に使用されてきた孔曲がり測定器、坑井記録傾斜儀『シングルショット傾斜計』(村田式)に比べて、測定精度が高い、掘削し

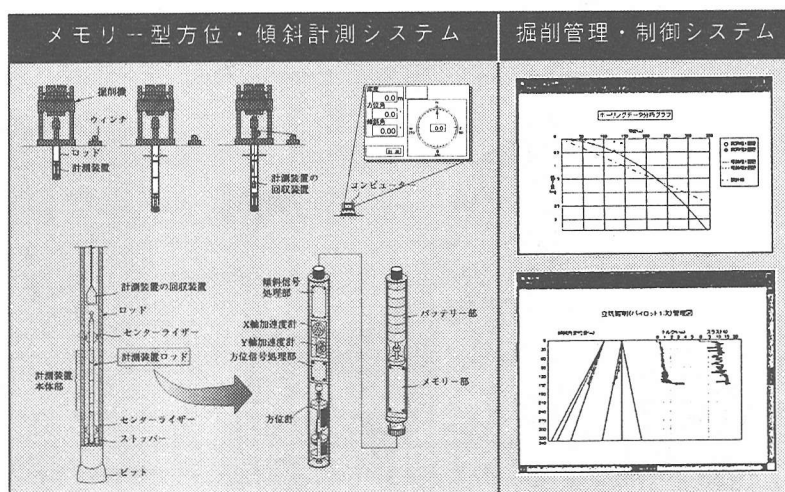


図-4 メモリー型方位・傾斜計測システムと掘削管理・制御システム

ながらの測定が可能、セットと取り出しに拘束される時間が全体的に短くて済む、測定値がデジタルで表示されるため読み取り誤差がない、等の利点がある。

「掘削管理・制御システム」は、ノーズダウンとビットの回転による孔曲がりの傾向を、試験掘削(本工事では1次パイロット孔)のデータより理論的に予測し、それに基づいてボーリング時の適正なスラスト力とトルクを管理するシステムである。将来的には計測データをリアルタイムで把握することにより、それをフィードバックして、機械のスラスト力、トルク等をコンピュータ制御する方向制御掘削が可能になると考えている。

2) ドリルストリングスの改良

斜坑のため先端部の荷重負担を少なくすること、また立坑に比べて鉛直角・方位角を測定する必要があることから、非磁性ロッドを使用し、可能な限り切羽に近い位置で孔曲がり測定が実施できるようにドリルストリングスを計画した(図-5)。

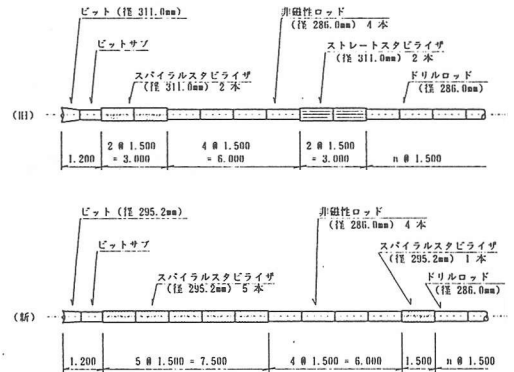
パイロット孔の直進性を向上させ、孔曲がりを軽減させるための改良のポイントは次の2点である。

- ① 掘削ビット径およびスタビライザ径をドリルロッド径に近似させ、ドリルロッド径に対する余堀りを少なくする。
- ② 切羽付近のスタビライザの配置本数を増やしビットの変位に対する拘束性を高める。

(2) 逸泥対策

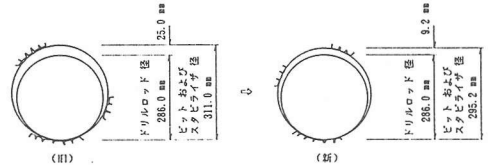
パイロット孔掘削開始当初から全延長のほとんどで逸泥があり、これは予測をはるかに超えたものであった。泥水掘りの他、エア掘りについても検討したが、石灰岩においては細粒分の孔壁への付着、亀裂へのエア漏れなどにより採用は難しく、掘削精度確保の観点からも泥水の循環が不可欠であると判断した。

このため逸泥対策として、各種逸泥防止剤の混入、セメンテーションなどを実施し改善を図った。



● 改善のポイント

① 掘削ビット径およびスタビライザ径をドリルロッド径に近似させ、ドリルロッド径に対する余堀りを少なくする。



② 掘削ビット直上のスタビライザの配置本数を増し、ビットの変位に対する拘束性を高める。
2本(3.0m) → 5本(7.5m)

図-5 ドリルストリングスの改良

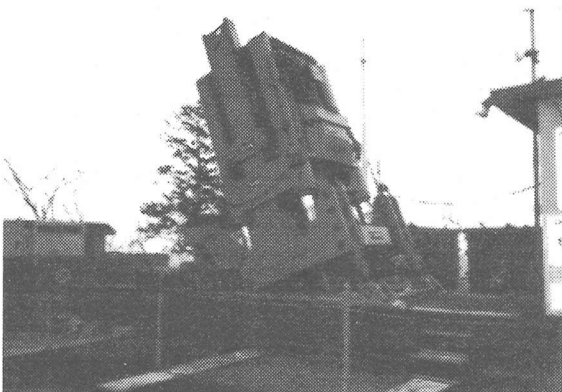


写真-1 RHINO 2006DC



写真-2 リーミング掘削開始

3. 2 リーミング工

パイロット孔の拡孔後、レイズボーラーをRHINO 1298DCからRHINO 2006DCに据え替え、坑底にてリーマーを組み立てて掘削を開始した。

当初、スラスト60～140t、トルク±5%を管理値に設定して掘削を開始したが、スラストの上昇に伴いトルクの変動が大きいため、スラストを低下させてトルクの安定を図った。しかし、途中2回スタビライザーのネジ部で切断が起き、リーマーが坑底のずり上へ落下した。幸い2回ともリーマーの損傷は少なかったため、リーマーのオーバーホール、点検後、新規開発のソリッドスタビライザーを採用し、掘削管理基準値を変更して掘削を再開した。

次に、リーミング掘削時のドリルストリングス切断の原因と対策について述べる。

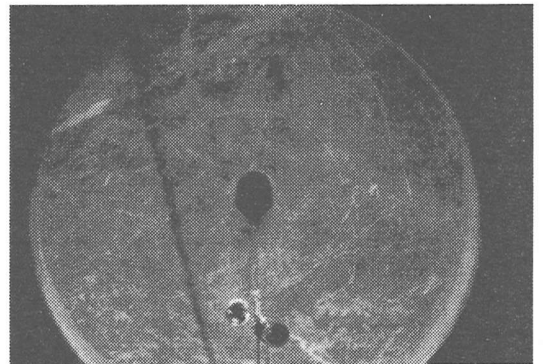
(1) ドリルストリングスの切断の原因と対策

1) 推定される原因

切断が発生したのは、掘削開始から56.55mと217.4mの地点である。2回ともロングステム直上のスタビライザーオスネジ部で発生した。切断部位と切断地点より、ドリルストリングスの切断は、過度の繰り返し応力の発生による金属疲労が原因であると推定される。過度の繰り返し応力は次のような状況から発生したと考えられる。

- ・スタビライザーの、特に凸部がパイロット孔の下盤を拡孔してしまうため、偏心荷重が作用した。
- ・地山不良箇所での切羽崩落によるリーマーの振れ。
- ・地層境界面の硬軟の変化によるリーマーの振れ。

写真－3に切断発生地点の切羽状況を、図－6に切断が起るに至ったと考えられる推定掘進状況図を示す。



写真－3 56.55m 付近の切羽状況

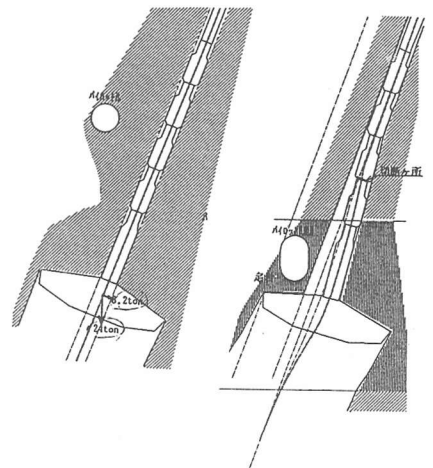
2) 対 策

上記の発生原因から、新規開発したソリッドスタビライザーの採用と、掘削管理基準値の変更で対応した。

従来のスタビライザー（ストレートスタビライザー、スパイラルスタビライザー）は、パイロット孔掘削時の直進性の向上、および泥水の循環を基本としており、ロッドの外周に凸部（ブレード）を取り付けた形状となっている。このためリーミング時にスタビライザーがパイロット孔の下側を削りやすく、これによってリーマーが振れたり、偏心荷重が発生する危険性が高くなる。

今回開発したソリッドスタビライザーはリーミング孔掘削専用に製作した。これは円筒形のものに最小限のみぞを彫り込んだ形状で、より円形に近い。このためパイロット孔を削ってしまう危険性はなく、また肉厚を厚くすることで強度を増加させてもいる。図－7にスタビライザーの形状比較を示す。

掘削管理基準値の変更は、リーマーヘッドの揺動を最低限にするために実施したもので、よりきめ細かくスラストとトルクの管理を行った。



図－6 掘進状況の想定図

3. まとめ

従来、レイズボーリング工法に対する問題点として、掘削口径が小さい、掘削長が短い、掘削精度が悪い（標準として、掘削口径：1.45m、掘削長：150m、掘削精度：1～2%程度）という指摘があった。しかしこれらはいずれも旧来の小型機での実績である。

今回、世界でも最大クラスの大口径・大深度のレイズボーリング工法を、亀裂性岩盤と傾斜坑という条件の下で施工した。施工にあたってはいくつかのトラブルにも遭遇したが、施工の無人化・省力化という当初の目的も達成し、こうした経験は我が国においても、今後のレイズボーリング工法の適用範囲を飛躍的に拡大するものになると考える。

今後、大型のレイズボーリング工法をより信頼性の高いものにしていくために、特に次の課題を挙げておきたい。

- ・パイロット孔における、より精度の高い方向制御掘削技術の確立とその自動化。
- ・亀裂性岩盤における効果的な逸泥防止対策。
- ・ドリルストリングス切断発生メカニズムの解明と、それに耐えうるドリルストリングスの開発。

最後に、本工事にあたりご協力いただいた、日本レイズボラーズ(株)、(株)村田製作所の皆様および関係各位に、心より感謝する次第である。

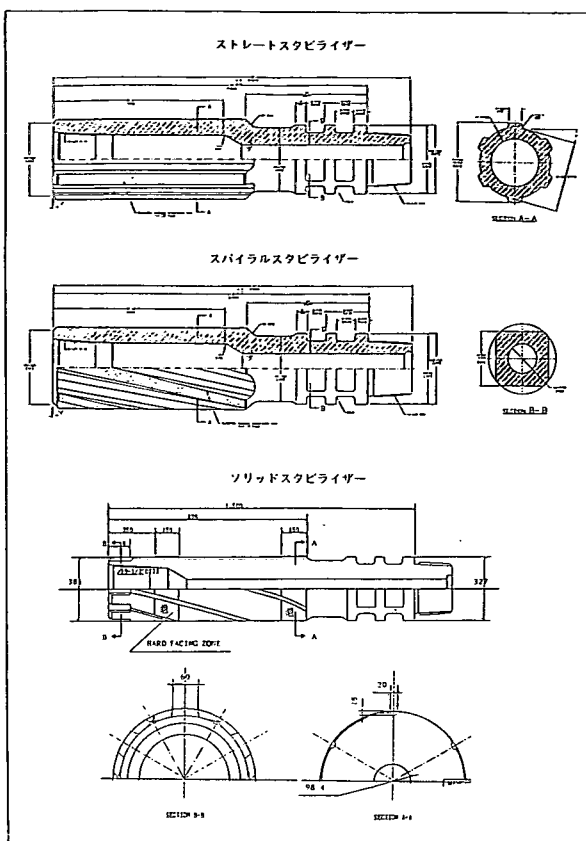


図-7 スタビライザーの形状比較

7. 参考文献

- 1) 日本レイズボークス（株） 資料
- 2) （株）村田製作所 資料