

3次元数値解析による切羽安定対策工の 効果に関する考察

CONSIDERATIONS FOR EFFECTS OF FACE STABILIZATION METHODS BASED ON 3D-FDM ANALYSIS

西崎 晶士¹⁾・羽馬 徹²⁾・岡部 正²⁾*

Shoushi NISHIZAKI, Tohru HABA, Tadashi OKABE

Under recent NATM tunnel construction, for ground where unstable faces exist or where many restrictions stipulated against ground deformation in surrounding area, it becomes popular to utilize auxiliary method to resolve such problems.

This report, following the previous report regarding the effect of various face stabilizing measures as auxiliary method announced last year, is intended to evaluate the effect of face stabilization by various auxiliary method utilizing 3D-FDM analysis.

In this report, ring cutting for face stabilization is included as evaluation object and examination was made on the effect of parallel use of different auxiliary methods.

In the past, influence of forepiling against temporally tunnel supports was often speculated intuitively but, this time focusing was made on relation between stress of tunnel supports and face stabilization measure and its results was shown by figures.

For analysis, we used FLAC3D which is easier for modeling of auxiliary method material at numerical analysis and has higher possibility of convergence at elasto-plastic analysis.

Key words : 3D-FDM, NATM, facebolt, forepiling, umbrella-method, advanced core, face extrusion

1. はじめに

最近の NATM によるトンネル工事においては、切羽が不安定な地山や周辺地盤変形に対する制約が大きい工事では、補助工法を利用して問題解決をすることが一般的となっている。

本報分は、補助工法による切羽安定対策工の効果に関する昨年の発表¹⁾に引き続き、各種補助工法の切羽安定効果を 3 次元数値解析により評価したものである。今回の報告では、核残しを評価対象に追加し、かつ補助工法の併用効果についても検討した。また、従来、先受け工法の支保工への影響は直感的に推測されることが多かったが、支保工の応力発生状況と切羽安定対策工の相関に着目した整理を行い、定量的結果として示した。

なお数値解析には補助工法部材のモデル化が容易で弾塑性解析における収束の確実性が高い 3 次元差分法解析コードである FLAC3D を使用した。

2. 検討対象の切羽安定対策工

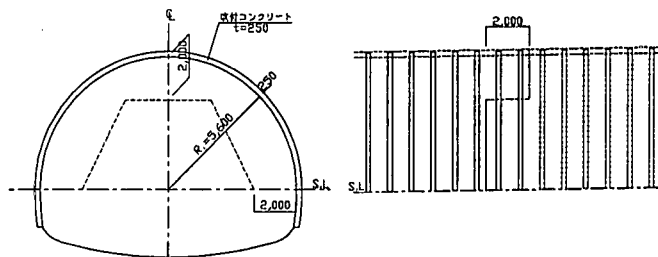
1) 正会員 清水建設(株) 土木本部 技術第二部

2) 正会員 (株)ケー・エフ・シー 技術部 技術開発課 (* トンネル技術室)

切羽安定対策工として用いられている主要な補助工法を図-1に示す。

(1) 核残し

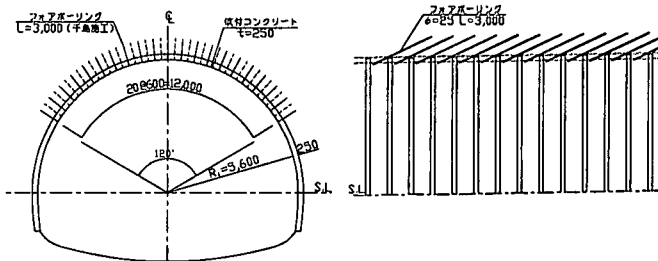
核により鏡面の押出し、緩みを抑制することを目的とする。支保の作業性に難があるものの、新たな機械設備や資材を必要とせず、容易に実施できることから、従来から広く用いられてきた。



(1)核残し

(2) フォアボーリング

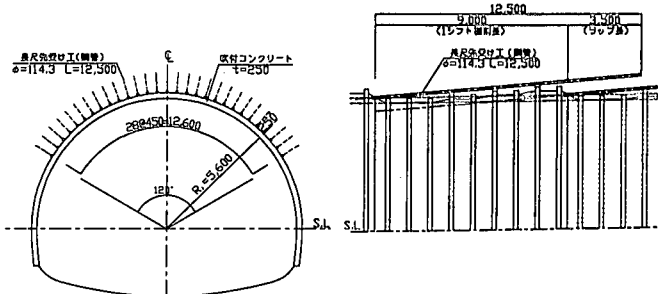
短尺の先受けで切羽前方の地山を補強し、天端部の小崩落や肌落ちを防止することを目的とする。



(2)フォアボーリング

(3) 長尺先受け工

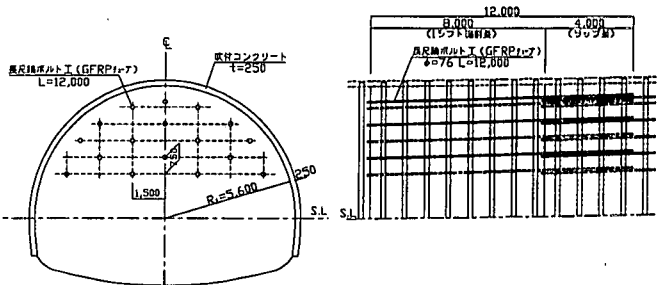
掘削に先立ってトンネル外周にアーチ状に先受け鋼管を配置して、事前補強的に天端部の荷重を鋼管で受け、地山の先行変位の抑制、天端部の崩落や肌落ち防止、地山の緩み防止、施工の安全性確保等を図る工法。長尺先受け工には、トレビチューブ工法、AGF 工法、高圧噴射改良工法、メトロジェットシステム工法等があるが、本解析対象としては、国内での採用実績の多い AGF 工法を選定した。



(3)長尺先受け工 (アンブレラ工法)

(4) 長尺鏡ボルト工

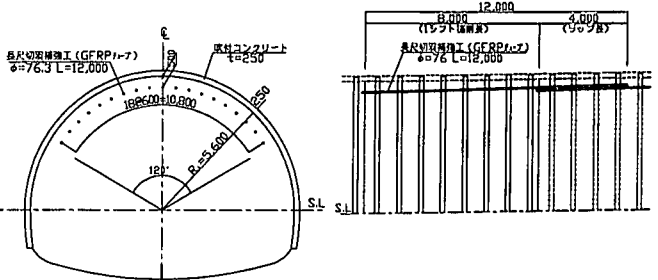
鏡面から長尺の GFRP 補強材を打設し切羽前方地山を拘束し、応力を三軸応力状態に保持して切羽の安定性を確保するもので、変形対策としての効果も期待できる。長尺鏡ボルト工単体による採用実績は少なく、先受け工だけでは切羽の安定を確保できない場合に併用する例が多い。



(4)長尺鏡ボルト工

(5) 長尺切羽リング部補強工

トンネル掘削線から若干下がった位置にリング状に GFRP 補強材を打設してアーチ周辺地山を中心に補強し、天端および鏡上部の緩みを抑制する、(3)(4)の中間的な工法。



(5)長尺切羽リング部補強工

実施工では、これらの補助工法が、地山条件やサイクルタイム、経済性などを比較検討した上で、単独あるいは組み合わせて採用される。そこで、上記の 5 工法を、単独あるいは組み合わせた場合の比較ができるよう表-1 に示すような 9 ケースを検討対象として選定した。

図-1 各種切羽安定対策工の施工

- 113 -

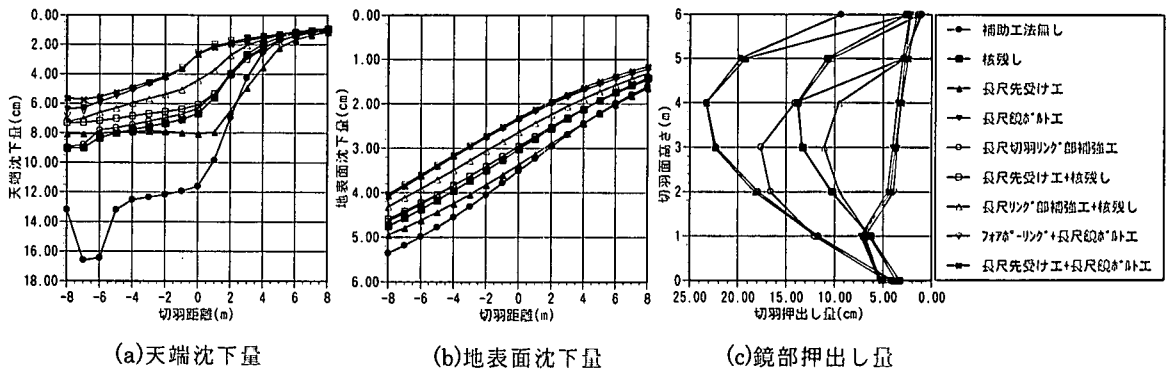


図-4 地山変位量 (STEP10: トンネルセンター)

鏡部全体の変位状況に着目すると、鏡部全体を補強する長尺鏡ボルト工の抑制効果が最も大きく、他のケースとは異なったモードとなっている。長尺先受け工については天端付近の押し出し量の抑制効果はみられるが、鏡部全体としては補助工法無しの場合と同等である。

(2) 最大せん断ひずみ分布図

図-5は掘削時の最大せん断ひずみを分布状況を示したものである。ケース①補助工法無しでは他のケースに比較し、鏡部に5%程度、既掘削部の天端上部地山部分に3%程度のひずみが発生している。各種切羽安定対策工を比較すると、ケース②核残しは押し出し挙動の抑制する効果とともに、既掘削部の天端のひずみを抑制する効果(発生ひずみ2%)がみられる。ケース③長尺先受け工については、既掘削部の天端のひずみ抑制効果は大きい、鏡部においては5%程度のひずみが発生しており抑制効果は殆ど見られない。ケース④長尺鏡ボルト工、および長尺鏡ボルト工と先受け工を併用したケース⑧、⑨の3ケースは同様のひずみ分布となり、鏡部のひずみ、既掘削部の天端のひずみのいずれに対しても抑制効果大きい。また長尺切羽リング部補強工と核残しを併用したケース⑦は、長尺先受け工と核残しを併用したケース⑥に比べ、切羽天端のひずみを抑制する効果大きい。

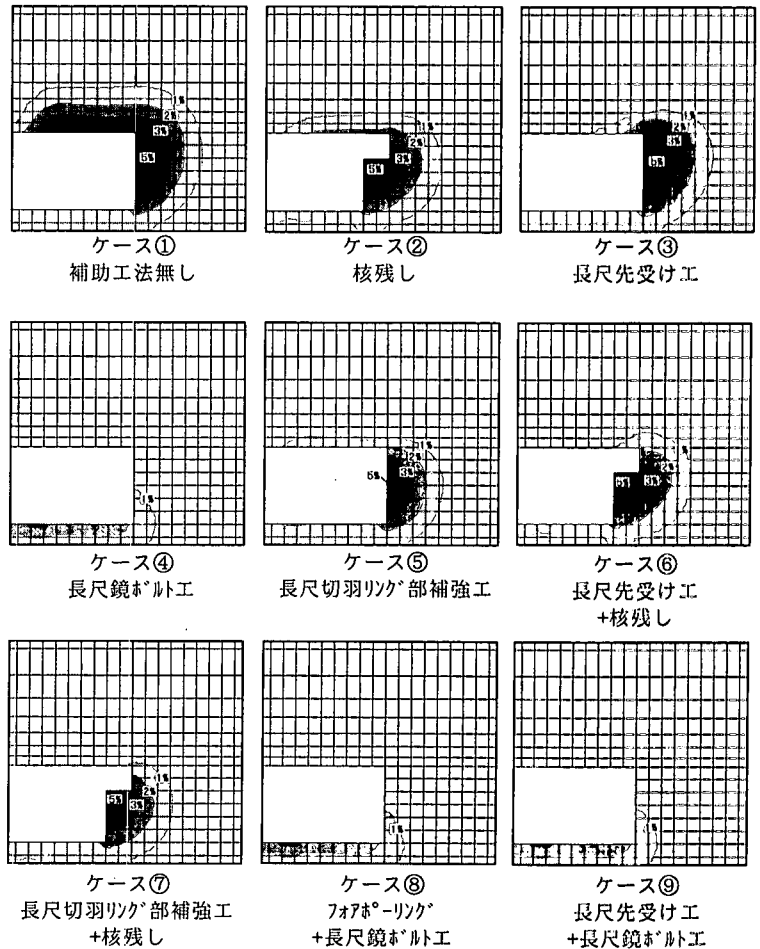


図-5 せん断ひずみ分布図

ケース⑧、⑨の3ケースは同様のひずみ分布となり、鏡部のひずみ、既掘削部の天端のひずみのいずれに対しても抑制効果大きい。また長尺切羽リング部補強工と核残しを併用したケース⑦は、長尺先受け工と核残しを併用したケース⑥に比べ、切羽天端のひずみを抑制する効果大きい。

(3)塑性領域

図-6は掘削時の塑性領域図である。図中の灰色のブロックは塑性領域を示す。補助工法無しの場合に比較して、各々の切羽安定対策工によって切羽上部の塑性領域の発生が抑制されている。ケース②核残しは鏡部前方および既掘削部天端の塑性領域の発生が抑制されている。ケース③長尺先受け工については、既掘削部の天端で塑性領域発生を抑制する効果はみられるが、鏡部前方では抑制効果は殆どみられない。ケース⑤長尺切羽リング部補強工は鏡部の塑性領域の発生を抑制するとともに天端についても抑制効果がみられる。長尺鏡ボルト工のケース④、および長尺鏡ボルト工と先受け工を併用したケース⑧、⑨の3ケースは、他のケースに比べると鏡前方の塑性領域の発生を抑制する効果が最も高く、既掘削部の天端の塑性化についても大きな抑制効果がみられる。

(4)支保軸力

図-7は支保部材 (Shell 要素) のトンネル縦断方向分布を示したものである。補助工法無し、核残し、長尺先受け工、長尺切羽リング部補強工、長尺先受け工と核残しを併用した場合、切羽から離れるに応じて軸力は増加しながら収束する傾向にある。長尺鏡ボルト工、フォアボーリングと長尺鏡ボルト工を併用した場合については、切羽から離れるに応じて軸力は減少しながら収束する傾向にある。また長尺リング部補強工と核残しを併用した場合、および長尺先受け工と長尺鏡ボルト工を併用した場合の2ケースはこれらとは異なるパターンの軸力分布となっている。

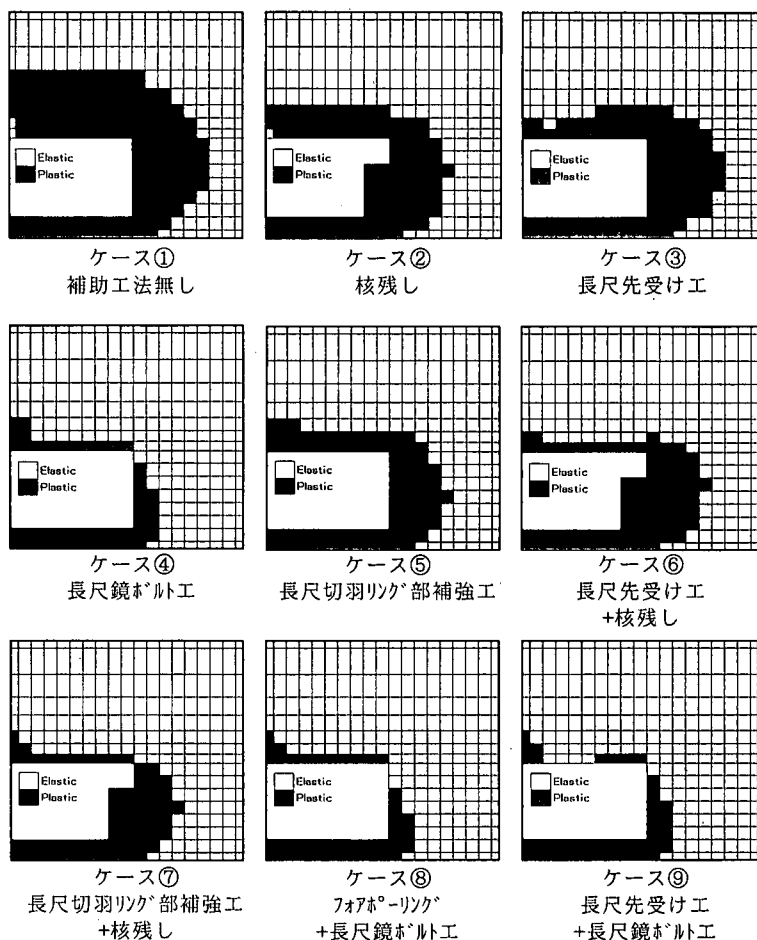


図-6 塑性領域図

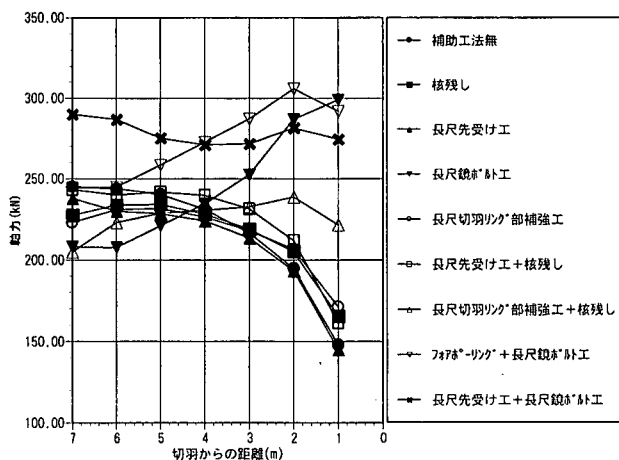


図-7 支保軸力分布図 (トンネル中心: 縦断方向)

5. まとめ

(1)切羽安定化効果

・核残しは鏡部が不安定な地山に広く用いられている低コストの対策工であるが、鏡部の押出し、天端部の変位、ゆるみ等の抑制に有効である。但し支保の作業性、ロックボルト打設の遅れ等の問題がある。

・長尺先受け工は、切羽天端付近の変形抑制効果はあるが、鏡部の押出し等切羽全体としての抑制効果は小さい。そのため天端崩落防止対策としては効果的と思われるが、鏡部の肌落ち・崩落や前方地山の押出し挙動に対する安定対策工の併用が必要になる場合も考えられる。

・長尺鏡ボルト工は、鏡部押出し抑制効果、変形抑制効果、塑性域の進展抑制効果が最も大きく、切羽安定対策工として非常に期待できる。但し本解析のような連続体解析では、天端の肌落ち等の挙動が再現し難いため、天端の肌落ち等の著しい地山では、何らかの先受け工との併用が必要である。

・長尺切羽リング部補強工は、長尺先受け工と同等以上の切羽安定化効果を持ちながら無拡幅工法のメリットを持つため、今後の試行が望まれる。また長尺切羽リング部補強工と核残しの併用は、地山の塑性化進展や鏡部押出しの抑制に相補的に機能し切羽安定対策工として効果的である。天端からの肌落ちが懸念される場合には、フォアポーリング等の併用が必要となることも考えられる。

(2)地表面沈下抑制対策

先受け工に最も期待される効果は切羽の安定化効果であるが、同時に地表沈下抑制効果を期待される場合も多い。図-4(b)によれば、沈下抑制効果は、長尺鏡ボルト工>長尺リング部補強工>核残し>長尺先受け工の順となった。これは、図-4(c)に示す鏡部押出しの抑制効果と一致する。この結果より、地表沈下抑制が強く求められる場合には長尺鏡ボルト工等の切羽前方地山を補強する対策工が有効と考えられる。

(3)支保工への影響

先受け工により、切羽前方周辺の地山の変形が拘束された場合、先受け工無しの場合に比較して切羽における応力解放率は小さくなるため、地山を線形弾性の連続体として仮定した場合には、支保に作用する掘削解放荷重は大きくなる。そのため、先受け工を施工した場合には先受け工無しの場合に比較して支保を重くする必要があるという考え方がある。また、一方では先受け工により、地山のゆるみを抑制することにより地山の変形が小さくなる結果、支保に作用する荷重は小さくなるという見方もある。図-7に示す結果は、そのいずれの場合もありうることを示している。すなわち、切羽から離れた区間では、長尺先受け工や長尺鏡ボルト工等の先受け工を施工した場合には、補助工法無しの場合よりも支保応力が小さい結果となっている。これは後者の見方を裏付けるものであり、図-6に示す切羽周辺地山の塑性領域の進展状況に符合する。一方、最も先受け効果の高いと考えられる長尺先受け工と長尺鏡ボルト工併用のケースでは、切羽周辺のゆるみの進展が最も小さいにもかかわらず支保応力が大きくなっている。このケースでは切羽近傍地山の変形拘束が極めて高いために、支保が掘削荷重の大部分を負担している現象とみることができ、応力解放率の概念による前者の評価を裏付けるものである。これらのことより、支保荷重と補助工法の関係は先受け効果と地山の塑性化（あるいはゆるみ）の程度により影響を受けるものであることがわかる。

6. おわりに

本報分で、各種切羽安定対策工の特性を明らかにでき、支保工挙動との関係の一部を示すことができた。これらの結果をもとにして、目的に合った最適な掘削施工法、例えば地表面沈下抑制が強く求められる場合の効果的な支保工、補助工法の設計などを検討していきたい。

参考文献

- 1) 竹林、西崎、他：切羽安定対策工に関する解析的考察、トンネル工学研究発表会 2000.