

計測管理による合理的な先受け工の施工

Efficient design of forepoling-method based on measurement

大橋弘紀¹・木村正樹¹・中野光雄²

Hiroki Ohashi, Masaki Kimura and Mituo Nakano

¹正会員 応用地質株式会社 関西支社 (〒532-0021 大阪市淀川区田川北 2-4-66)

oohashi-hiroki@oyonet.oyo.co.jp

¹正会員 応用地質株式会社 関西支社 (〒532-0021 大阪市淀川区田川北 2-4-66)

masaki-kimura@oyonet.oyo.co.jp

²兵庫県八鹿土木朝来事業所 (〒679-3431 兵庫県朝来郡朝来町新井 80-3)

AGF-method is one of the most major forepoling-method. However, the design of AGF-method is not efficient, because there is no quantitative evaluation of the effect of AGF-method.

In design and construction stage of AGF-method ; it is needed to understand sufficiently the characteristic such as displacement action of the periphery natural ground. This paper used measurement data for numerical analysis to study the ground movements and load generation during the construction stage.

Key Words: AGF-method, forepoling, measurement, numerical analysis

1. はじめに

あすなろトンネル(延長623m、2車線道路トンネル、図1)では坑口部および中間の鞍部に表1に示す問題を抱えており、AGF工法(トンネル先受け工、切羽前方に改良体の傘を形成する)が補助工法として設計されていた。これに対し、坑内・坑外での計測データや施工データを積極的に活用し、工事の安全・品質を確保しつつ分布地質に応じた補助工法の最適化を実施した。

2. 地質・計測概要

トンネルルート周辺には、超丹波帯地層群(表2に示す頁岩、砂岩、緑色岩等からなる)が分布しており、比較的古い地質であることから潜在亀裂が発達している。また、熱水変質により緑色岩が変質し、亀裂に粘土をはさむ区間もある。さらに、土かぶりが50m程度のところまで褐色の流入粘土が侵入し地山が緩んでいる区間もあった。鞍部及び起点側坑口部の断面図と計測概要について図2～図4に示す。各観測ポイントに対し、表1に示す計測機器を組み合わせることで観測を行った。三次元地中変位計伸縮計を

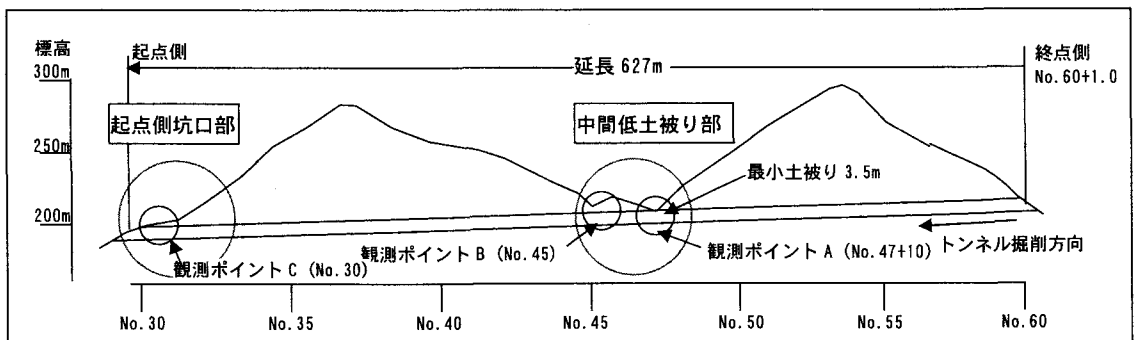


図1 トンネル概要図

表 1 補助工法概要表

	位置	問題点	対策工法	目的	その他計測器
A	No. 47+10 (中間最小土被り部手前)	最小土被り 3.5m. 偏圧地形	無拡幅 AGF 工法 (シリカレジン注入)	最小土被り部での補助工法最適化及び安全性確保	支保工応力計、覆工応力計、ロックボルト軸力計、3次元地中変位計、地表面伸縮計
B	No. 45 (中間最小土被り部通過後)	切羽全面が崖錐層			3次元地中変位計、地表面伸縮計
C	No. 30 (起点側坑口部地山ソイルセメント境界)	偏圧地形。坑口と斜面が直行しない。	ソイルセメント置き換え工+無拡幅 AGF 工法 (シリカレジン注入)	起点側坑口部施工安全性確保、補助工法妥当性評価	地表面伸縮計、支保工応力計、地表面傾斜計

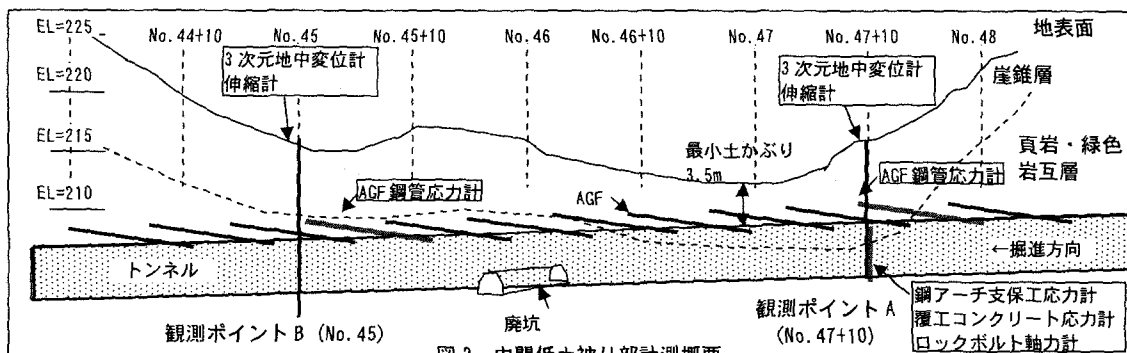


図 2 中間低土被り部計測概要

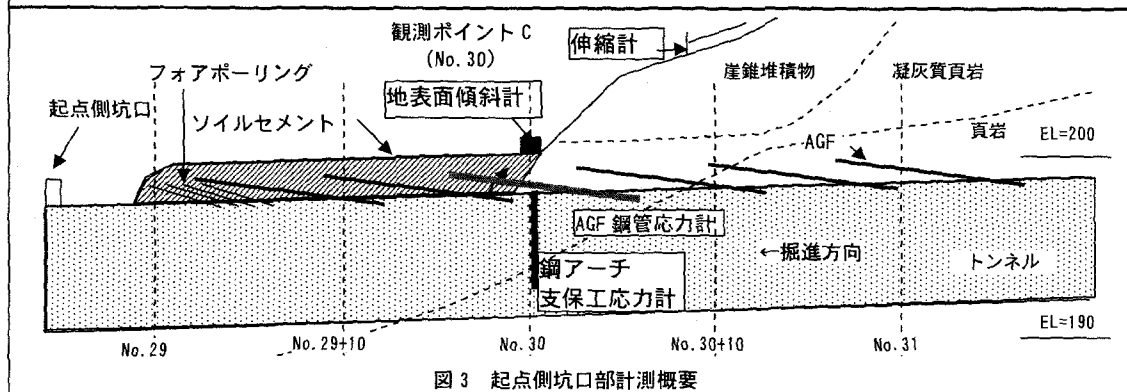


図 3 起点側坑口部計測概要

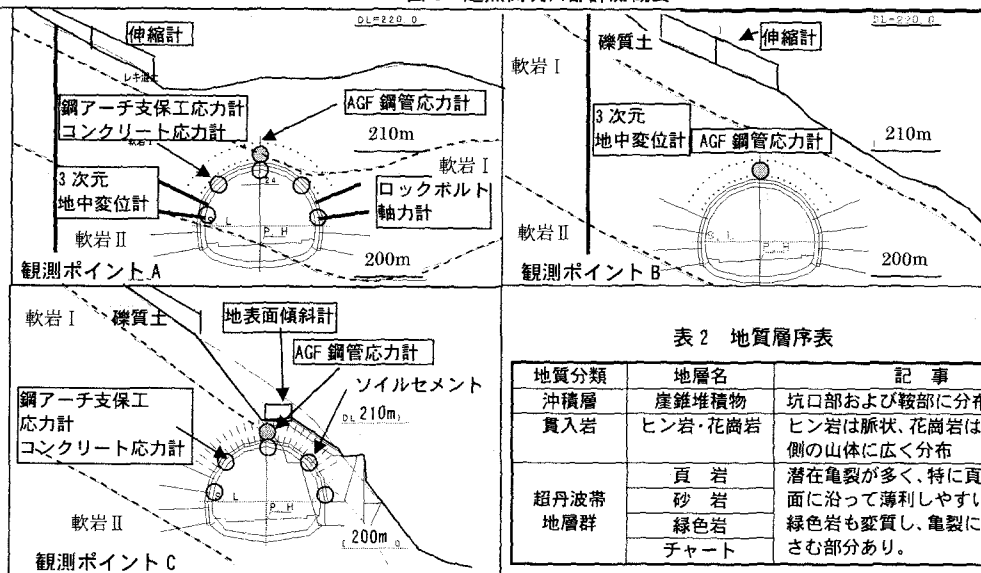


図 4 各観測ポイント断面図

表 2 地質層序表

地質分類	地層名	記事
沖積層	崖錐堆積物	坑口部および鞍部に分布
貫入岩	ヒン岩・花崗岩	ヒン岩は脈状、花崗岩はルート北側の山体に広く分布
超丹波帯地層群	頁岩	潜在亀裂が多く、特に頁岩は層理面に沿って薄利しやすい。
	砂岩	緑色岩も変質し、亀裂に粘土をはさむ部分あり。
	緑色岩	
	チャート	

除き観測はデータロガーによる自動観測とし、必要に応じデータの吸い上げを行った。

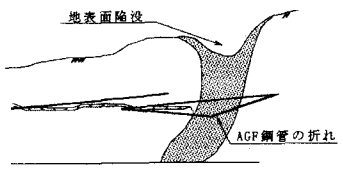
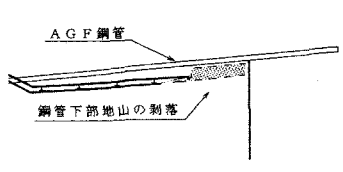
3. 施工管理と補助工法最適化フロー

これまでの施工管理では支保工や補助工法の増加の検討や、補助工法の妥当性確認の例はあったが、施工中にデータをフィードバックし補助工法の最適化を行った例はあまりない。よってこれまでになく正確ですばやい施工中の管理と補助工法の検討体制が求められた。そこで、予測される切羽崩壊パターン

ンと管理方法を設定しておき（表3）、図5に示す観察・計測管理フローで施工管理を行った。管理基準値は各支保工の許容応力度および岩石の限界ひずみの50%, 75%, 100%を管理レベルⅠ、Ⅱ、Ⅲと設定した。

また、補助工法の再検討は図6に示されるフローチャートによりを行うこととした。補助工法の最適化はAGF 鋼管応力計だけで判断せず、他の計測データ・切羽観察・トンネル内空変位・天端沈下・薬液注入量・火薬使用量などを総合的に判断して検討を行った。

表3 予測される切羽崩壊パターンと管理方法

	①大崩落・地表面陥没	②鋼管間からの小崩落・抜け落ち	③鋼管下部の地山剥離
概要			
原因	土圧が集中（鋼管の許容応力<土圧）	改良不十分	ラップ長不足・改良不十分
現象	地表面陥没 トンネル天端・切羽崩落	地表面陥没 トンネル天端・切羽崩落	撤去管と同時に崩落
管理	AGF 鋼管応力計およびその他計測データを中心に管理	三次元地中変位計、切羽観察および薬液注入量を中心に管理	切羽・施工状況観察で管理。

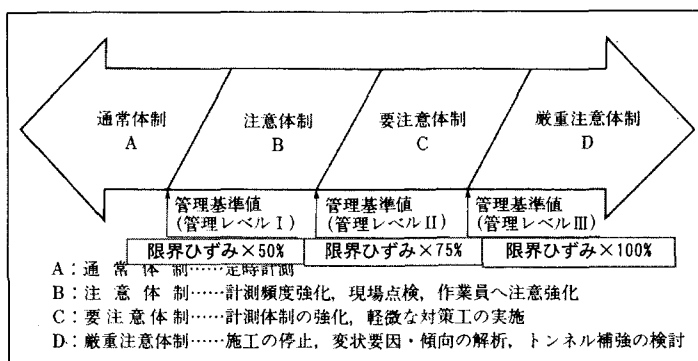


図5 観察・計測管理フロー²⁾

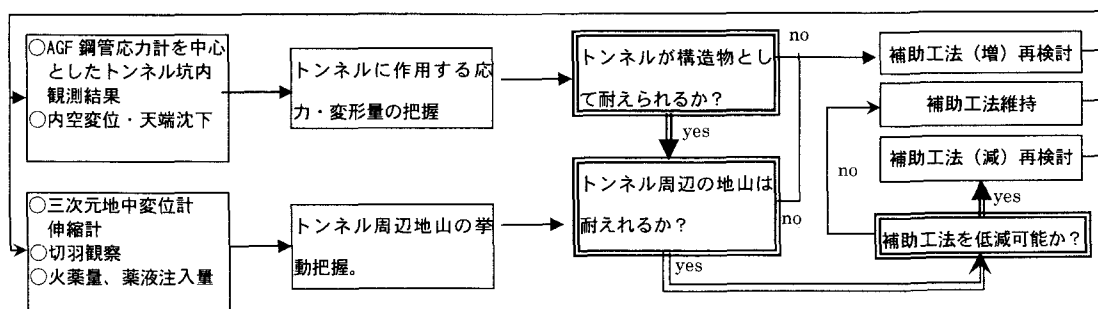


図6 補助工法最適化フロー

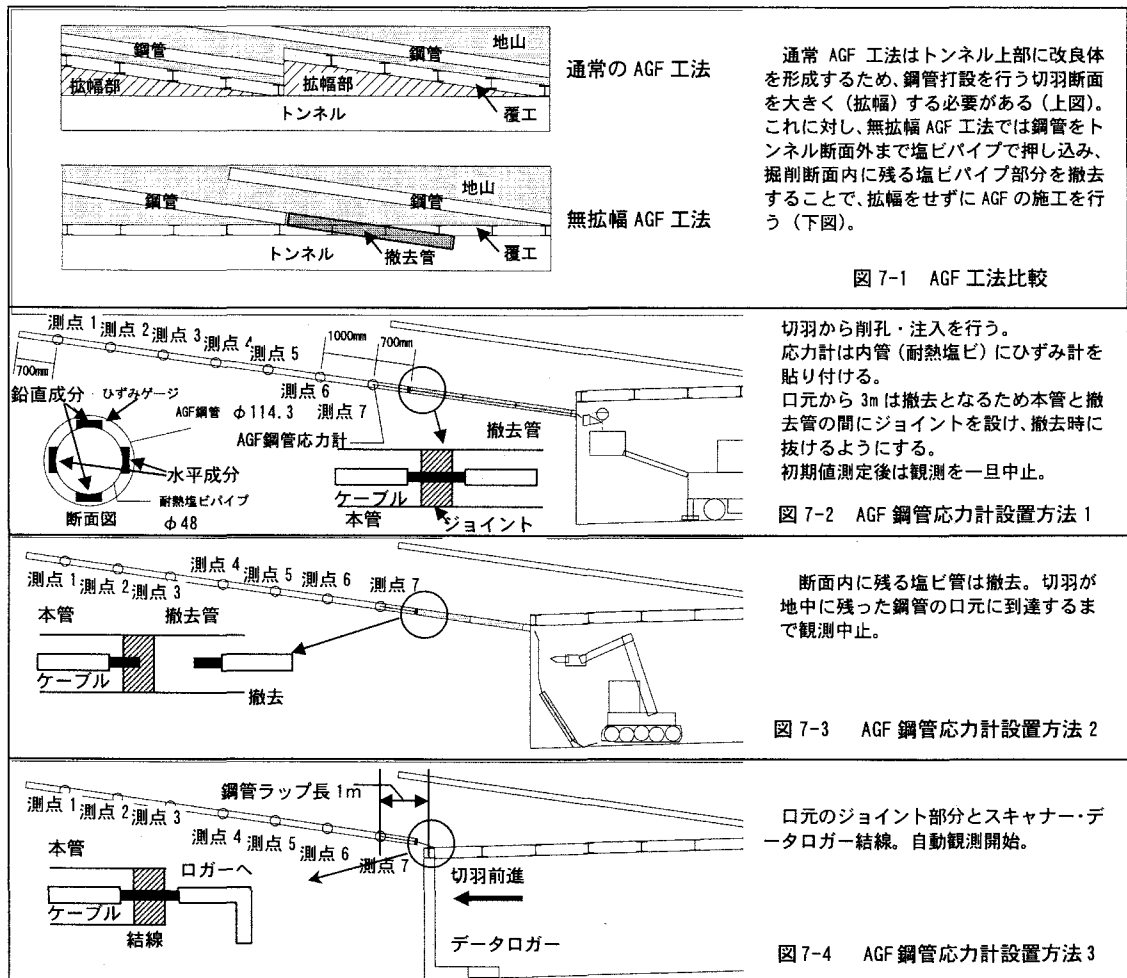
4. 無拡幅 AGF 工法及び AGF 鋼管応力計概要

AGF 工法とは鋼管と注入材によって地山を先行補強する長尺鋼管フォアパイリングの一種である。これにより未固結地山や不良地山でも切羽天端の崩落を防止するとともに、地山の变形を抑制し掘削時の緩みを抑制できると言われている²⁾。通常 AGF 工法はトンネル上部に改良体を形成するため、鋼管打設を行う切羽断面を大きく(拡幅)する必要があるが、無拡幅 AGF 工法では鋼管をトンネル断面外まで塩ビパイプで押し込み、掘削断面内に残る塩ビパイプ部分を撤去することで、拡幅をせずに AGF の施工を行うものである(図 7-1)。

図 5-2 に AGF 鋼管応力計の概要について示す。AGF 鋼管応力計は AGF 鋼管の内管にひずみゲージを 1m

ピッチで貼り付け、鋼管の曲げ応力を観測するものである。起点側坑口部については地山からのトンネル横断方向変位が予測されたため、図 7-2 に示すように 2 方向にひずみゲージを貼り付け、鉛直方向と水平方向の曲げ応力観測を行った。図 7-2～図 7-4 に AGF 鋼管応力測定方法について示す。通常の AGF 工法では施工後すぐに計測が開始できるが、無拡幅 AGF 工法ではトンネル断面内に入る部分を撤去してしまうため、切羽が地中に残った鋼管の口元に到達した時点からの観測となる。つまり、AGF 施工直後から、切羽が地中に残った鋼管の口元に到達するまでに鋼管に発生した曲げ応力は観測できない。これは AGF 工法の妥当性を十分に評価できない。そこで今回は図 7-2～図 7-3 に示すように本管と撤去間の

表 7 無拡幅 AGF 工法と応力測定方法



間にジョイントを設置し、撤去管内の配線を引き抜けるようにした。これにより AGF 施工後すぐに初期値を観測し、切羽が地中に残った鋼管の口元に到達したときに再観測することで、AGF 施工直後からの鋼管の曲げ応力を把握することが出来た。

5. 観測結果

AGF 鋼管に作用する応力分布とその経時変化を表

表 5 AGF 鋼管応力計観測結果

AGF 鋼管応力計応力分布 (観測ポイント A)	AGF 鋼管応力計応力分布 (観測ポイント B)
支保工との接合部測点 7 で応力が発生しているが値は大きくない。切羽進行による応力変化は見られないが、次シフトの AGF 施工 (5m 進行時) により変化を生じている。土被り荷重は小さいが、改良体の間を地山がすり抜けている可能性もあるため注意が必要。	切羽位置で比較的大きな応力が発生し、切羽進行とともに応力分布が変化している。このことから切羽前方の緩み範囲は小さいと考えられる。支保との接合部である測点 7 ではレベル II の応力が発生しているが他はレベル I 以下。以上のことから補助工法の低減を検討すべきである。
AGF 鋼管応力計応力分布 (観測ポイント C 鉛直方向)	AGF 鋼管応力計応力分布 (観測ポイント C 水平方向)
ソイルセメントと地山の境界部分 (測点 5) で曲げ応力が発生しており、境界部の地山が下方へ移動した応力分布となっている。ただし、曲げ応力は小さく AGF 工法が有効に作用している。	鉛直方向と同様、ソイルセメントと地山の境界部で応力が発生。境界部が谷側へ変状した応力分布となっている。応力値は小さい。

5-3 AGF 施工時の地山の挙動

本トンネルではトンネル坑外で三次元地中変位計を設置し、地山の挙動観測を行った。図 7 に AGF 施工手順を示し、図 8 に AGF 削孔前からトンネル通過までの地山変位量と切羽位置の関係を示す。観測結果から AGF 施工時にすでに変位が生じており、切羽到達までに全変位の 72% の変位が生じていた。また、最小土被り通過時には地表面は AGF 削孔時に沈下し、薬液注入後に隆起することでトータルの変位量が小さくなっている。さらにソイルセメント改良部での

地表面傾斜計の観測結果(図 9)を見ると、薬液注入後の地表面は AGF 口元から先端方向へ傾斜していた。

以上のことから地山の変位抑制を目的に AGF 工法の選定を検討する場合、以下の点を考慮する必要がある。

- ①切羽到達後のトンネル内空変位は非常に小さくなるが実際は先受け工施工時に変位が生じる。
- ②トータルの変位は抑制できるが施工の際には比較的大きな変位が生じる。

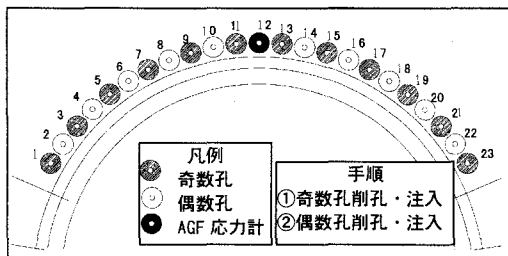


図 7 AGF 施工手順

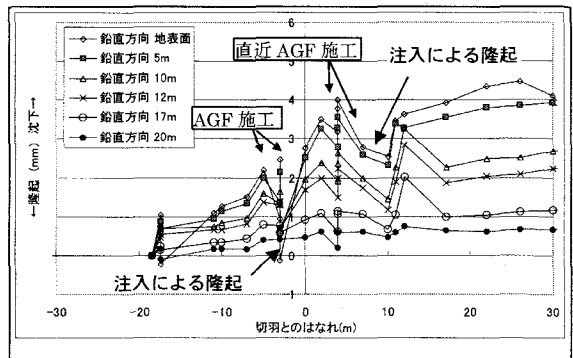


図 8 AGF 施工から切羽通過までの切羽位置と地山変位の関係

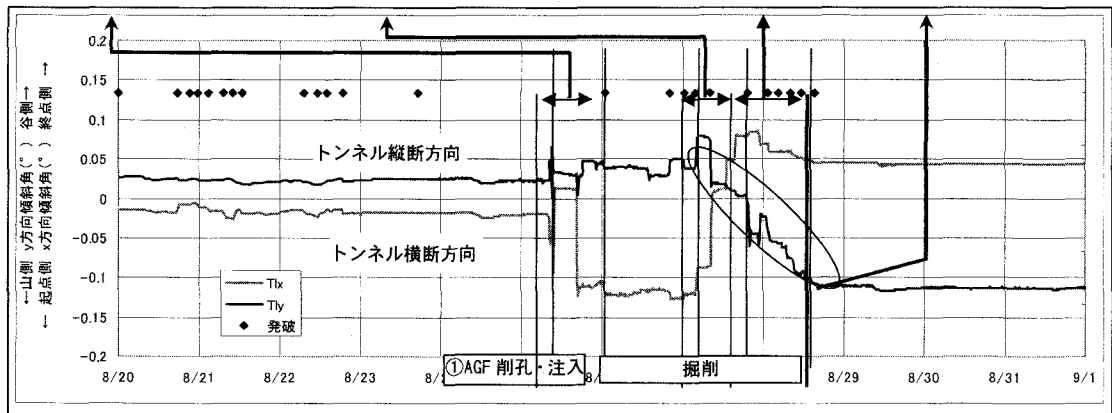
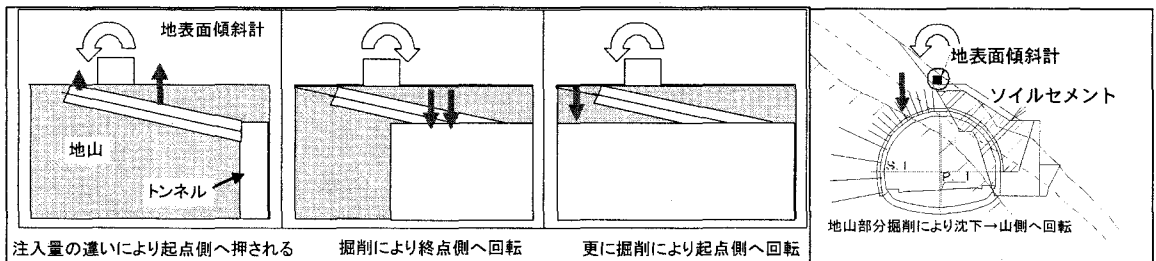


図 9 地表面傾斜計観測結果(観測ポイント C)

6. AGF 効果の定量的な評価

6-1 評価手法

AGF の効果を定量的に評価することを目的に、断面 2 次元 FEM 解析を実施した。解析メッシュを図 10 に示す。AGF による地山改良効果は No. 47+10 での坑内・坑外 B 計測結果、A 計測結果を再現しうる地山変形係数を解析により求め評価した（逆解析）。さらに、この地山変形係数を用いて、No. 47 及び No. 45 断面で予測解析（順解析）を実施し、AGF の適用を検討した。

6-2 評価結果

図 11 に No. 47+10 での逆解析結果を示す。解析の結果、観測結果を再現するためにはトンネル周辺地山の変形係数を $2200\text{kg}/\text{cm}^2$ に設定する必要がある。つまり、AGF による地山改良効果は見かけ変形

係数で $2200\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度と評価されたことになる。

6-3 以降の補助工法について

図 12 及び図 13 に No. 47、No. 45 での予測解析結果を示す。予測は No. 47+10 での逆解析結果をもとに AGF により周辺地山は変形係数が $2200\text{kg}/\text{cm}^2$ に改良されるとして行った。予測解析結果の評価は予測解析で得られたせん断ひずみと変形係数に対する限界ひずみを比較することで行った。No. 47、No. 45 ともせん断ひずみが限界ひずみを超えないと評価された。

7. 補助工法検討結果

観測結果をもとにした補助工法検討結果を表 6 に示す。この結果に沿って施工が行われ、コストを削減しつつ安全に施工が完了し、その後の変状も生じていない。

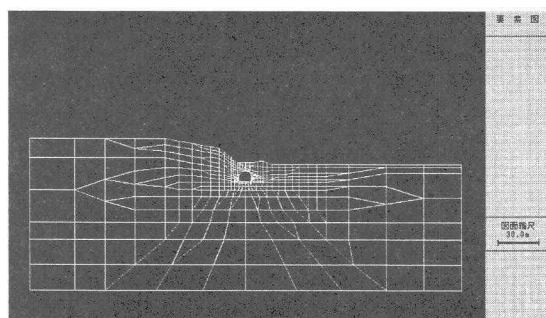


図 10 解析メッシュ図
(No. 47+10 解析エリア全体)

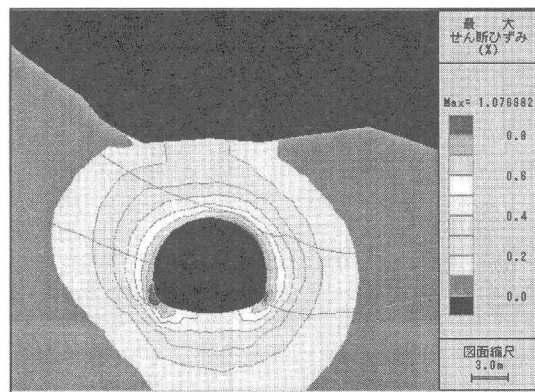


図 11 No. 47+10 逆解析結果

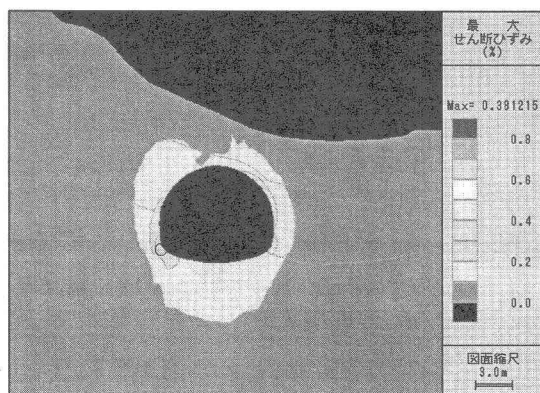


図 12 No. 47 予測解析結果

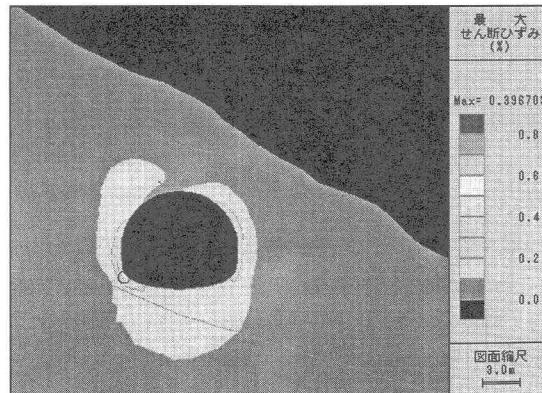


図 13 No. 45 予測解析結果

表 6 補助工法検討結果一覧表

位置	No. 47+10 (最小土被り部手前)	No. 45 (最小土被り部通過後)	No. 30 (起点側坑口部)
AGF 鋼管応力計	管理レベルⅠ以下	管理レベルⅠ～レベルⅡ	管理レベルⅠ～レベルⅡ
その他坑内 B 計測	管理レベルⅠ以下	観測なし	管理レベルⅠ以下
測			
坑内 A 計測	管理レベルⅠ以下	管理レベルⅠ以下	管理レベルⅠ以下
トンネル構造物に作用する力	小さい	小さい	小さい
地質	前面崖錐	天端～左側壁部まで崖錐～風化岩。他は CⅡ～DⅠ地山	天端～左肩までソイルセメント他は CⅡ～DⅠ地山
坑外 B 計測	管理レベルⅠ以下。ただし、薬液	管理レベルⅠ以下	ソイルセメント地山境界部
	注入により沈下・隆起が認められる。		で伸縮計 mm。
薬液注入量	定量以上	崖錐部は定量。岩部は定量以下	定量～定量以下。
火薬使用量	少ない	若干増量	一部発破。他は機械掘削。
地山挙動評価	地山はゆるく、グラウンドアーチを形成できない。	切羽部分は自立するが天端はゆるく、グラウンドアーチが期待できない。	ソイルセメントは十分な強度だが天端～右肩の地山は不安定。
観測結果総括	トンネルに作用する力は小さいが、グラウンドアーチ形成の期待できない崖錐層が切羽に出現する。また、薬液注入により地山が隆起沈下していることから密な薬液注入が必要。	AGF 鋼管に発生している応力は小さいため、45cm ピッチの鋼管は必要ないと判断。ただし、トンネル上部はグラウンドアーチの期待できない崖錐層であるため薬液注入は続行。	鉛直方向・水平方向とも地山境界部で応力が発生。ソイルセメント内は応力が発生しておらず伸縮計にも動きがないことから地山の押し出しはない。
対策工	設計どおり 45cm ピッチでの無拡幅 AGF 工法。	60cm ピッチでの無拡幅 AGF 工法へ変更。最終は充填式フォアボーリングへ変更	地山部分のみ無拡幅 AGF 工法。最終は充填式フォアボーリング (妥当性確認)。

8. まとめ

坑内・坑外 B 計測や施工データを積極的に活用することでトンネル掘削施工中に補助工法の最適化を実施した。また、AGF 鋼管の応力分布を観測することで AGF の効果を確認することができた。しかし、応力分布は分布地質によって異なるため AGF 鋼管応力のみでは補助工法の妥当性評価や補助工法の最適化はできなかった。地質データ・他の計測結果・施工データを効果的に適用することが必要である。今後は FEM 解析等のシミュレーションも導入し、更なる補助工法の適正化を行っていききたい。

参考文献

- 1) 注入式長尺先受け工法 (AGF 工法) 技術資料 (三訂版)、ジオフロンテ協会
- 2) 山岳工法における補助工法の効率的な設計施工法に関する調査検討報告書、社団法人 日本トンネル技術協会
- 3) 佐々木、高山、塚田、木村、鳥居：鉄道直下の大断面トンネル瀬工事の計測管理、トンネル工学研究発表会第 10 巻、2000.6