

神長トンネルの長尺先受け工区間の変形挙動

THE MOVEMENT AND TRANSFORMATION AT LONG FORE-PILING SECTION IN KANAGA TUNNEL

阿久津 雅一*・神澤 幸治**・岡島 元**・渡辺 浩平***

Masakazu AKUTSU, Koji KANZAWA, Hajime OKAJIMA and Kohei WATANABE

This study was carried out about the evaluation of result of field measurement by three-dimensional FEM analysis. KANAGA TUNNEL is located on northeast of Tochigi prefecture. The length is 712m, the cross section is over 100m². The area from tunnel entrance to 200m, is developed by the Jurassic Yamizo Group which are formed by Slate, Sandstone and Chart, and Yamauchi Formation (the Miocene Nakagawa Group) which are formed by Tuff and Tuff breccia. The rock condition was very unstable in this area. So we adopted long fore-piling (AGF) and etc for the condition. And we're carried out field measurement by EDM in this area. And the result of FEM analysis sufficiently corresponded to the result of field measurement.

1. はじめに

栃木県那須郡南那須町と烏山町において、主要地方道宇都宮・烏山線の改良が、交流ふれあいトンネル橋梁事業として進められている。

神長トンネルは、この計画区間にあり、延長712m、内空断面積100m²の二車線道路トンネルである。

さらに、その大きさが栃木県の道路トンネルの中で第一位となる大断面トンネルに位置づけられている。

この神長トンネル掘削途中で、不整合面と破碎帯の交錯する状況に遭遇し、その際、地山状況や計測結果に基づき、現象に対して段階的に対処することで、厳しい条件を克服することができた。そこで、施工方法と現地計測結果、さらに3次元有限要素法による解析結果について考察を行った。

2. 施工方法と EDM (Electro-optical Distance Meter) による計測結果について

本工事は、烏山町側から、上り勾配1.5%、NATMによる上半先進ベンチカット工法を用いて、機械掘削により慎重に施工を進めて来た。地質は、図-1に示すように、坑口から40mまでは、粘板岩主体の中・古生代八溝層群、以奥120mまでは、凝灰岩、凝灰角礫岩主体の新第三紀中川層群山内層であり、さらに以奥は、履歴ならびに組成の異なる八溝層と山内層が複雑に錯綜し、さらに不整合面および破碎帯が連続して出現するという極めて不安定な状態であった。その間の施工は、まず坑口から120m付近まではウレタン注入式フォアパイリング(L=3,4m)を補助工法として部分的に採用しながら掘り進めた。しかし、坑口から120m付近で不整合面および破碎帯が錯綜する部分へ突入し、切羽前方7mに渡り大規模な滑動崩落を生じた。

* 正会員 栃木県烏山土木事務所

** 正会員 清水建設(株)栃木土木事務所

*** 正会員 清水建設(株)技術研究所土木研究開発部

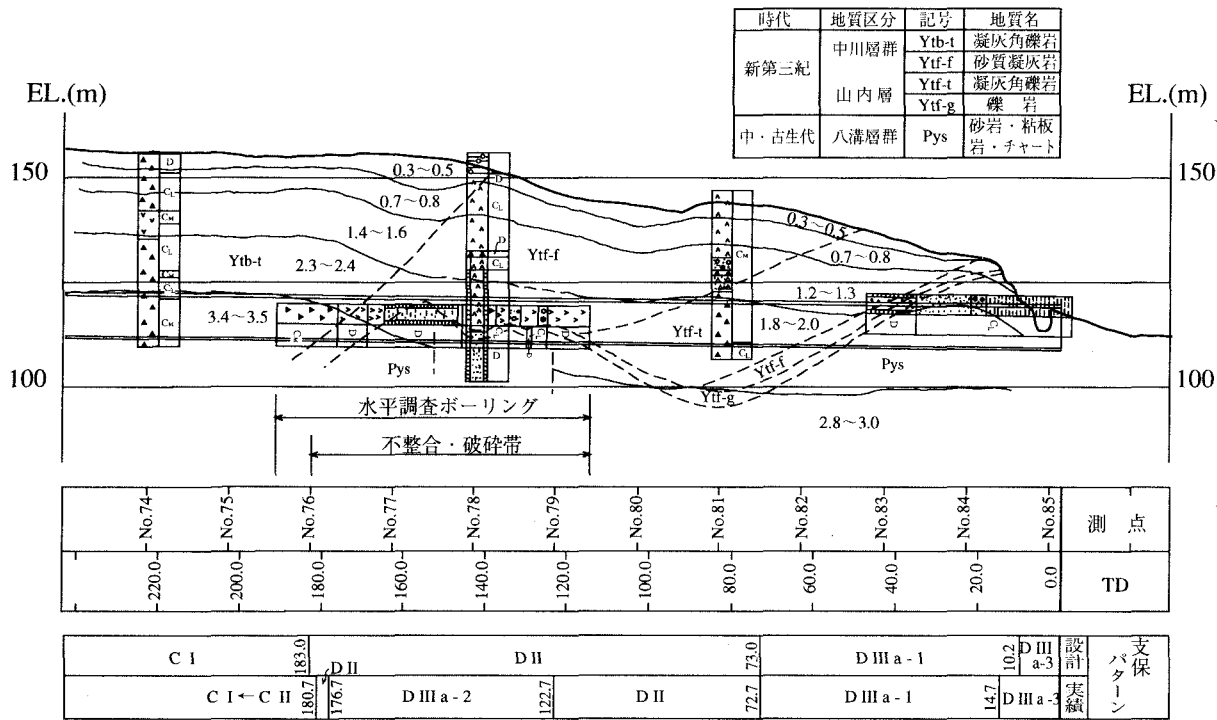


図-1 坑口から200m付近までの地質断面図

その崩落部を観察すると、鏡肌が鮮明に見られ、過去にかなりのせん断作用を受けた痕跡や潜在亀裂、極度の風化腐食跡も認められたため、かなり劣悪な地山状態にあると判断した。

そのため、この地山条件を克服するために、まず、以下の対策を講じた。

- ① 地山強度増加と空洞充填のために、切羽前方12mを薬液注入（懸濁型LW）
- ② 水平調査ボーリングにより、前方の地山状況を調査

先行緩みが7m近く発生したことから、注入式長尺先受け工法（AGF工法）を採用し、先行緩み抑止と天端安定を同時に図る。さらに、AGFルーフ傘下を、坑口から130m付近まで掘削したところ、AGFルーフ傘下であるにもかかわらず再び切羽前方5mに渡り滑動崩落を生じた。LWによる改良ゾーンを超え、その効力外での掘削となったため、切羽の小崩落が一気に上部へ拡大し、AGF鋼管をも座屈させた。このことから、AGFにより天端の先行緩み抑止を図ることに加えて、切羽面自体を強化する必要があると判断した。

そこで、

- ③ AGFと共に、切羽面強度向上として、切羽前方にLW注入

以上のように、AGF工法とLW注入を効果的に併用し、不整合面と破碎帯の交錯する部分を突破することに成功した。

その間、現地計測結果は、天端沈下で5～8mm/day、内空変位で3～6mm/dayと急激な増加傾向を示した。また、切羽が進行しなくても、変位は増加の一途をたどるため、早急に内空断面を確保し、変位抑制を行う必要があった。

そこで、まず掘削の完了した上半底部を、吹付コンクリート（t=25cm）により仮閉合した。この対策により、変位を一次的に抑制することが出来た。

しかしながら、下半掘削が接近してくると、さらなる変位増大と側壁背面からの崩落が予想された。

そこで、下半掘削にもウレタン注入式フォアパイリング (L = 4 m) を併用することで緩みを抑制し、変位増加を最小限にとどめることを試みた。

さらに、インバートコンクリートによる早期閉合を試みた。

その際、インバートコンクリート施工の前処理として、掘削後直ちに吹付コンクリートを打設し断面を閉合させる。さらに、その早期に発現する梁効果により変位を最小限とし、その効果発現後、インバートコンクリートを打設することで変位を収束させることができた。

このように、変位に対し細心の注意を払い、断面閉合を早期命題として処理したことで、天端沈下、内空変位とも結果的には収束させることに成功した。

上述の施工方法について、図-2 にまとめて示した。

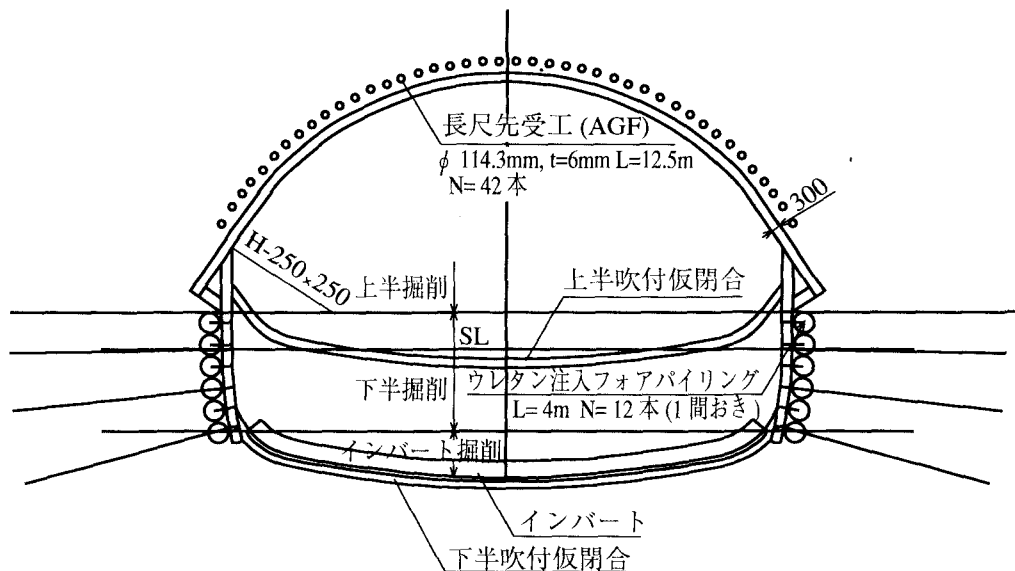


図-2 支保構造図

3. 3次元有限要素法解析

3.1 解析モデルおよび解析領域

解析には3次元有限要素法による解析コード「3D-σ」を用いた。図-3には、今回用いた3次元の解析メッシュを示した。

解析領域は、左右対称として半断面のみをモデル化し、トンネル軸方向 (Z方向) はTD 105 m ~ TD 171 m の66 m区間とし、また、地表面の形状を考慮してTD 114 m ~ 129 mの間は7 mの高低差をつけ鉛直方向 (Y方向) は地表面から69 m ~ 76 m区間、トンネルと直交する方向 (X方向) は対称面から40 m区間とした。

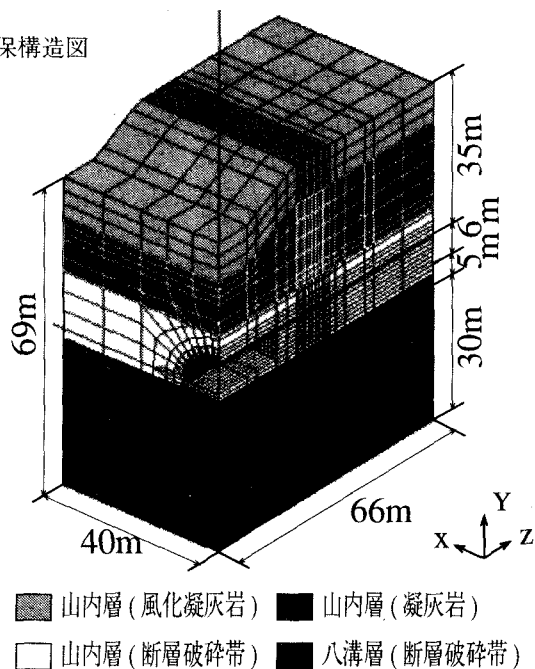


図-3 解析モデル

横断面におけるトンネルから境界までの距離は、トンネル側壁から32m、インバート部からは下方30mの位置に設定した。

土被りは、2.8m～3.5mとした。

メッシュ幅は、実際の施工状況を忠実に再現できるように計測地点付近では1mとし、計測点から離れるにつれて粗くなるように設定した。

なお、計測地点は、TD133mである。

3.2 地盤条件および解析条件

地層については、図-1の全体図から計測点の近くにありこの領域の地層を評価する上で重要な測点No.78(TD143m)でのボーリング調査結果に基づく地層構成および物性値を表-1に示した。なお、地山は弾性体としてモデル化を行った。

地層は上位から新第三紀中川層群山内層の風化凝灰岩、細粒～粗粒凝灰岩、断層破砕帯、中・古生代八溝層群断層破砕帯からなっている。

図-4には、計測地点(TD133m)を含むTD129m～138m区間の支保部材の位置関係を示した。

図に示すようにTD137m～138mの1m区間を掘削した時の各支保部材の位置関係は切羽手前1mまで鋼製支保工(H-250)とロックボルト(長さ6m)が1m間隔で、吹付コンクリートが厚さ30cmで打設されている。

また、切羽から5m手前までは上半仮閉合用の吹付コンクリートが厚さ25cmで打設されている。

長尺先受工についてはAGF鋼管のみを図示した。AGF鋼管は解析では12mとして、TD132m～TD144mに打設した第2シフトの部分のみを示した。

また、シリカレジンの注入によりAGF鋼管まわり50cmの地山が改良されているとした。なお、注入による改良体の変形係数は改良効果を考慮して地山の変形係数の20倍とした。

表-1 地山物性値

	表層および山内層 (風化凝灰岩)	山内層 (凝灰岩)	山内層 (断層破砕帯)	八溝層 (断層破砕帯)	注入改良体
深度(m)	0～9	9～28	28～43	43～	—
湿潤密度 ρ_1 (g/cm ³)	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
変形係数 E_{50} (MPa)	11	11	11	11	220
ポアソン比 ν	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40

表-2 支保部材諸元

	長尺先受工 (AGF)	鋼製 支保工	吹付 コンクリート	上半 仮閉合 吹付 コンクリート	ロック ボルト
モデル化	梁	梁	シェル	シェル	ボルト
弾性係数 E (MPa)	2.1×10^5	2.1×10^5	4000	4000	2.1×10^5
断面積 A (cm ²)	20.41	92.18	3,000	2,500	5.07
断面2次モーメント (cm ⁴)	300.21	10,800	—	—	—
備考	L=12m ϕ 114.3mm t=6mm	H-250	t=30cm	t=25cm	L=6m

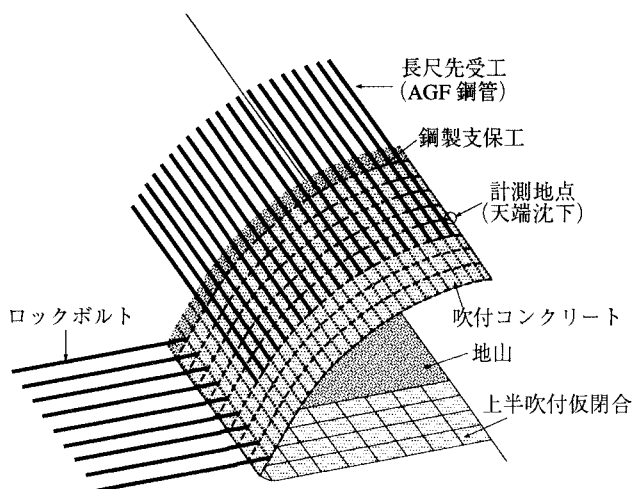


図-4 支保部材のモデル化

解析では、鋼製支保工、AGF鋼管は梁要素、吹付コンクリートはシェル要素、ロックボルトはボルト要素としてモデル化し、用いた物性値は表-2に一覧表にして示した。

3.3 解析結果

図-5には計測地点(TD 133 m)において得られた切羽の進行に伴う天端沈下の計測値(●)を示した。計測は切羽通過後3 mの時点から開始した。天端沈下は切羽が3 mから40 mまで進行する間に92 mm発生した。また、図には3次元有限要素法解析によって得られた解析値(○)を示した。解析値は切羽が-19 mから38 mまで進行した場合について、3 mにおける値を基準として示した。これより、解析値と計測値は良い対応を示すことが分かった。なお、解析結果によると切羽が計測地点に到達した時点から計測を開始した3 mの地点まで進行する間に31 mmの天端沈下を生じていることが分かった。

図-6には上半吹付仮閉合の効果を検討するため、仮閉合が有る場合(○)と無い場合(●)の解析結果を示した。比較はTD 133 m地点において切羽が-19 mから38 mまで進行した場合について3 mにおける値を基準として行った。この結果、仮閉合が有る場合は102 mm、無い場合には123 mmとなり、仮閉合により天端沈下が0.83倍に抑制されることが分かった。

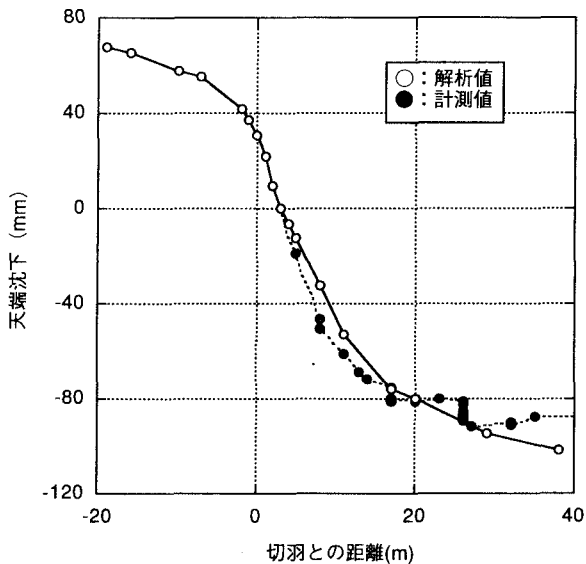


図-5 天端沈下の計測値と解析値の比較 (TD133m地点)

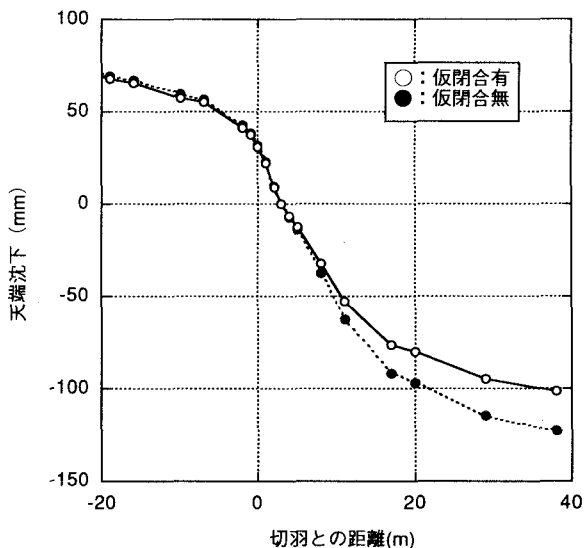


図-6 仮閉合の有無による天端沈下の比較 (TD133m地点)

4. まとめ

今回、神長トンネルにおいて坑口から120 m付近から不整合面及び破碎帯が連続して出現するという極めて不安定な地山条件に遭遇したため注入式長尺先受け工法(AGF工法)などを採用し先行緩み抑止と天端安定を同時に図った。この長尺先受け工区間における天端沈下の計測結果について支保部材の施工過程を考慮した3次元有限要素法解析を行ったところ計測結果と良い対応が得られた。また、吹付コンクリートによる上半仮閉合の効果についても解析結果から裏付けられた。

5. 参考文献

1) ジェオフロンテ研究会：注入式長尺先受け工法(AGF工法)技術資料(三訂版),1997.