

長尺切羽補強工を施工した切羽前方地山の挙動について

Behavior of the ground ahead of the face reinforced with long GFRP face forepiling

清水 利郎¹⁾, 尾畑 洋¹⁾, 松尾 勉²⁾, 手塚 仁³⁾, 岡部 正⁴⁾

Toshirou SHIMIZU, Hiroshi OBATA, Tsutomu MATSUO, Hitoshi TEZUKA and Tadashi OKABE

The Aki-Fuchu twin tunnels on the Hiroshima Expressway No.1 have two lanes each, with 30 to 40 m overburden. The geology of that region is composed of heavily weathered granite and diorite, which are extremely decomposed due to deep weathering. Therefore, the tunnel face is unstable and the convergence is noticeable. For ensuring face stability, tunneling is advanced with long face forepiling using glass fiber reinforced plastic tubes. The long face forepiling has found wider applications these days. However, almost no quantitative measurement data are available at present. In this context, the authors determined the ground behavior by measuring the axial force in the long face forepiles and the displacement ahead of the face, and quantitatively evaluated the effect of this technique by conducting numerical analysis.

Key Words : tunnel, long face forepiling, extrusion measurement, face stability

1. はじめに

広島高速1号線(安芸府中道路)は山陽自動車道広島東I.C.と広島市中心部を直結する自動車専用道路である。このうち安芸府中トンネルは、下り線1026m、上り線990mの双設トンネルであり、土被りは30~40mあるが強風化花崗岩・強風化閃緑岩が強く深層風化の影響を受けてマサ状を呈しており、切羽の自立性が悪く坑内変位も大きい。このため、地上部にある変電所、鉄塔、民家等の構造物に影響を及ぼさないように、先行変位抑制も兼ねた切羽安定対策工として、グラスファイバー補強プラスチックチューブを長尺鏡補強部材および長尺先受け部材として打設する長尺切羽補強工法により、切羽前方地山を補強しながら掘削している。

長尺切羽補強(鏡補強)工法は、近年、その有用性に着目され適用実績が増大しているが、補強効果や切羽前方地山の挙動については、定量的な計測データがほとんど得られていないのが現状である。そこで、切羽前方地山の挙動に着目して、長尺補強部材に発生する応力ならびに切羽前方地山の変位に関する計測を行ってこれらの相互関係を把握するとともに、数値解析により計測値との定量的な比較を行った。

本報告では、長尺補強部材応力・地中変位計測の結果、ならびに解析による検証の結果について報告する。

2. 地質概要

安芸府中トンネル周辺の地形は、古い土石流扇状地の様相を呈し、傾斜角10°程度の山稜型緩斜面地帯となって

1) 熊谷・前田・鴻治共同企業体 安芸府中トンネル作業所

2) 正会員 ㈱熊谷組 土木事業本部トンネル技術部

3) ㈱熊谷組 土木事業本部トンネル技術部

4) 正会員 ㈱ケー・エフ・シー トンネル技術室

いる。トンネル掘削対象地質は、強く深層風化の影響を受けマサ状を呈した強風化黒雲母花崗岩ならびに強風化閃緑岩である。ボーリングコアでの一軸圧縮強度では $q_u = 0.5\text{MPa} \sim 5\text{MPa}$ と低い値を示すが、特に強風化閃緑岩では鉱物レベルまで脆弱化することで、切羽では土砂状地山を呈している。なお、地下水位は G.L. -10m 付近の基盤(マサ)と表層(土石流堆積物ならびに崖錐堆積物)との境界付近に位置している。

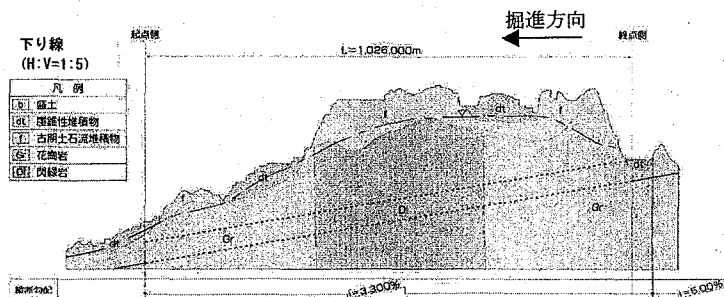


図-1 地質概要図

3. 工法の概要と施工パターン

長尺切羽補強工法は、切削可能なグラスファイバー補強プラスチックチューブ (Frp Injection Tube、以下、FIT という) を外管として二重管方式で穿孔し、これを補強部材とするとともに周囲にウレタン系等の注入材を注入して切羽前方に改良体を形成する工法である¹⁾ (図-2)。FIT は、外径 76mm、内径 60mm で、1 本あたり 3m のものをつないで所定の部材長とする。当トンネルでの部材長および打設パターン (ラップ長、打設間隔、本数) は、既往の計測データ²⁾ならびに施工実績等を参考に、表-1 のとおり設定した。なお、下半部の鏡補強工については、強風化花崗岩との地質境界付近で発生した大きな切羽押し出し現象 (図-3) の対策として追加した。

表-1 長尺切羽補強工法の施行パターン

項目 種別	部材長	ラップ	本数	打設範囲	打設間隔
長尺先受け工	14m	7m	29 本	天端中心 120°	0.45m
長尺鏡補強工	14m	7m	31 本	上・下半	1.5m × 1.5m

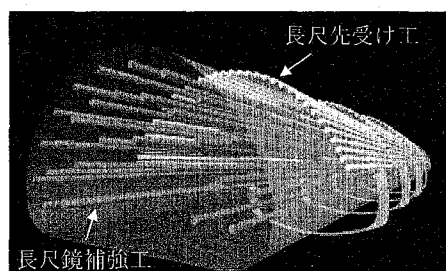


図-2 長尺切羽補強工法の概念図

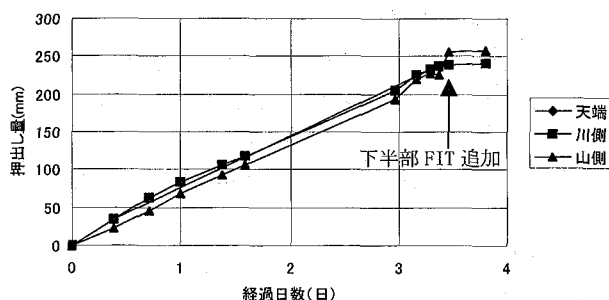


図-3 切羽押し出し変位図

4. 計測工

計測は、先行する下り線トンネルの坑口から約 350m 付近にて下記の計測項目を実施した。

- ・長尺先受け工応力測定 (14m, 13 測点)
- ・長尺鏡補強工軸力測定 (14m, 8 測点)

・切羽前方地中変位測定 (21m, 6 測点)

計測器の概要を図-4に、計器配置を図-5に示す。長尺補強部材の応力計測は、二重管方式で穿孔し地中に存置するFITには直接ひずみゲージを貼付することができないため、ひずみゲージを貼付したセンサー管をチューブ内に挿入し注入材により一体化することで、FITに発生するひずみを測定し、応力を求める。このうち、鏡補強部材に設置されるものは掘削に伴いセンサー管も切除されるため、データは先端部に小孔径の埋設型データロガーを設置し、掘削が当該箇所まで進んだ時点でデータロガーを回収する方式としている。一方、切羽前方地山変位計測は、長尺切羽補強部材計測より1スパン(7m)手前で設置し、応力計測と同じ埋設型データロガーと測定装置(多点変位計)をセットした先端部が仮不動点となるようにアンカーで固定し、FRP製変位ロッドで連結した各測点との相対変位を測定する機構である。

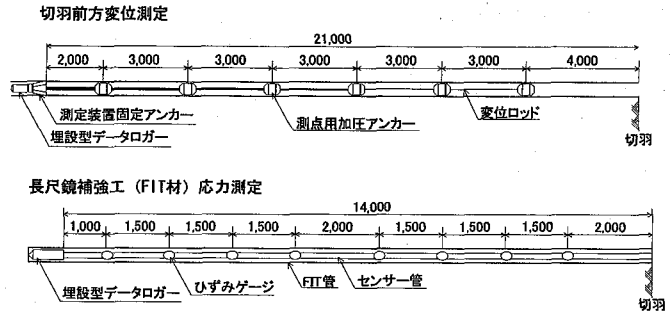


図-4 計測器概要図

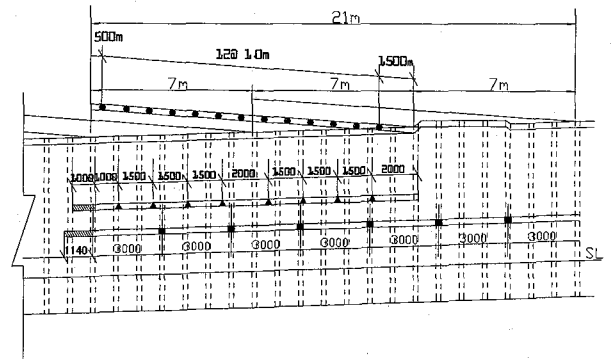
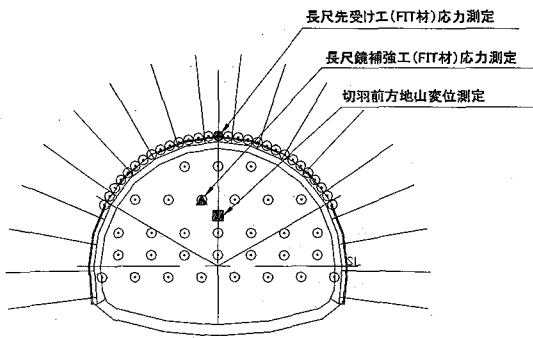


図-5 計器配置図

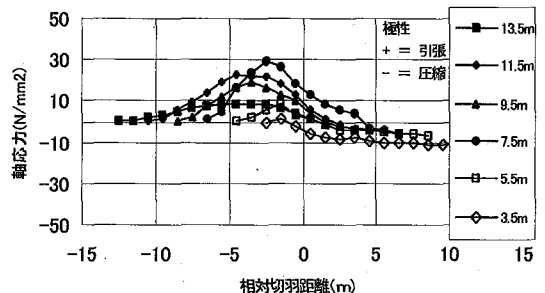
5. 計測結果

(1) 長尺先受け部材応力

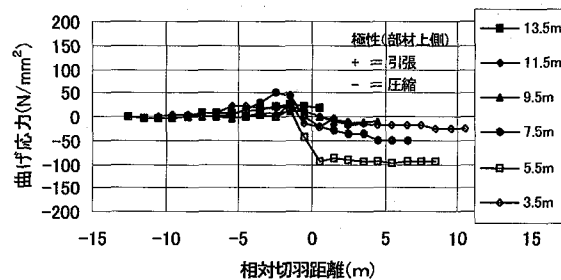
部材軸応力は、切羽の通過前3~5mまでは最大 30N/mm^2 の引張応力が発生しており、引張部材として機能している。切羽通過後の圧縮応力は最大 10N/mm^2 で、切羽が通過する前後から圧縮部材として機能している。また、曲げ応力は切羽の通過前後で地山側に凸(部材上側引張)から内空側に凸(部材上側圧縮)の極性に変化しており、従来の長尺鋼管先受け工と同様の挙動を示している(図-6)。

(2) 長尺鏡補強部材応力

各測点とも切羽の接近に伴って引張応力が増加し、最大値は軸力に換算して 120kN である。切羽に近い測点(5m, 6.5m)では設置直後から軸力が急増している。一方、深部の測点(11.5m, 13m)では切羽が8~10m離れているところから引張抵抗力を発揮し始め、



(a) 軸応力



(b) 曲げ応力

図-6 長尺先受け部材応力経距変化図

切羽距離が5～6m付近にかけて勾配が増大している。軸力が最大になるのは切羽距離が3～4m付近で、そこから切羽直近の間では軸力は減少している。

(3) 切羽前方地山変位測定

切羽近傍の測点(3m)では、変位計設置直後から変位が急増しているが、全体的には、相対切羽距離が7～8m付近までは変位がなく、4～6mの間で徐々に変位が発生している。その後切羽の接近に伴って変位が増大し、3m以内ではその変化が著しい。最大値は切羽到達時(掘削に伴う計測終了時)で約90mmである。深部の測点では、切羽が接近したときの変位増加が小さく、全変位量も30～40mmと切羽に近い測点に比べて小さいが、この時点では仮不動点としている先端部(21m)も変位をはじめ、相対変位が小さくなっているためと考えられる。

(4) 計測結果のまとめ

以上の計測結果より、長尺補強部材の発生応力と切羽前方地山変位との関係を領域ごとにまとめると以下のとおりとなる。

切羽から7～8m以上前方では、長尺鏡補強部材は引張抵抗力を発揮し始めているが、地山の変位はほとんど発生しておらず、先行変位の影響が出ない領域として、切羽付近の地山を拘束する定着部として機能していると考えられる。

つぎに、切羽から4～5mまでは地中変位が発生し始め、補強部材の軸力もこれに比例して増加しているが、弾力的な先行変位を生じながらも、地山の緩みを抑えている領域であると考えられる。さらに、切羽近傍の2～3m付近では、地山の変位が急激に増加している一方で補強部材の応力は低減しており、この付近から切羽にかけては先行緩み領域(塑性領域)であると考えられる。

以上より、長尺切羽補強工は切羽前方の1D(D:トンネル径)に近い領域から切羽前方地山を拘束し、先行変位の発生や先行緩みの拡大を抑制する機能を発揮しているものと考えられる。

6. 数値解析

(1) 解析条件

切羽前方地山の変位、補強工部材応力等の長尺鏡補強工の効果確認のために有限差分法(3D-FLAC)を用

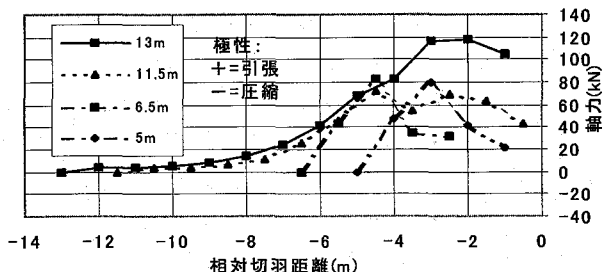


図-7 長尺鏡補強部材軸力経距変化図

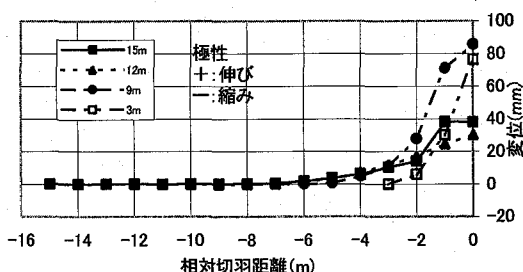


図-8 切羽前方地山変位経距変化図

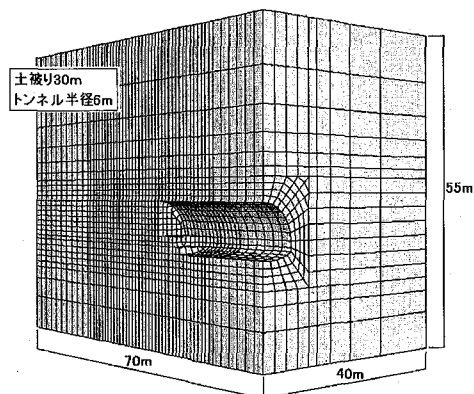


図-9 3次元解析領域

表-2 地山の入力物性値

単位体積重量 (γ) KN/m ³	弾性係数 (E) MPa	ポアソン 比(ν)	粘着力 (c) MPa	内部摩擦角 (ϕ) °
20	50	0.35	0.01	30

表-3 各部材の入力物性値

	単位体積重量 KN/m ³	弾性係数 MPa	断面積 m ²	断面二次 モーメン トm ⁴
吹付コンクリート +鋼製支保工	23.8	7,495	2.00E-01	-
FIT (長尺切羽リング部、 長尺鏡ボルト)	17.5	20,000	1.71E-03	1.00E-06

いた3次元数値解析を行った。

解析領域を図-9に示す。境界条件は地表面を自由面、他の面はローラー境界とし、Mohr-Coulombの破壊基準を用いた弾塑性解析とした。表-2、表-3に地山、支保部材の入力物性値を示す。なお、支保部材については鋼製支保工と吹付けコンクリートを合成部材としてモデル化した。解析上の掘削ステップは、境界から27mまでを一括掘削の後、20m間を逐次掘削区間として、上・下半を4m離れで1mごとに同時掘削した。また、インバートは下半より2m離れとし、7mごとに一括掘削

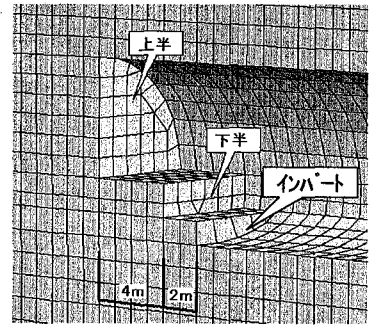


図-10 解析における加背割

(2) 解析結果

上半切羽より10m後方における坑内の変位量は、天端沈下:25mm、上半水平変位:100mmで対象区間における計測値(天端沈下:18~47mm、上半水平変位:61~108mm)と概ね一致しており、表-2の物性値を用いた解析により当トンネルの挙動を良く表現できることが確認された。

図-12、図-13に、FIT設置後、切羽が2m進行した時点の切羽前方地中変位および長尺鏡補強部材軸力の縦断方向の分布図を示す。地中変位は変位量、変位分布ともに計測結果とよく一致している。切羽前方5~6m(測定位置:7~8m)までは大きな変位は発生せず、約10mmの変位量であるが、切羽前方3~4m(位置5~6m)付近から切羽にかけては変位、変位勾配ともに大きくなり、切羽で最大となっている。

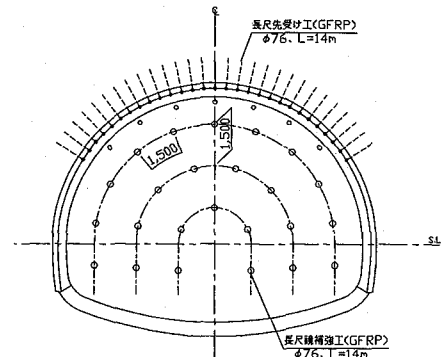


図-11 長尺切羽補強工法パターン概要図

長尺鏡補強工の軸力分布も、計測結果に比べて変化が緩やかであるものの、分布形態は概ね一致していることがわかる。補強部材の先端から徐々に増加する軸力は切羽前方3m(位置5m)付近で最大値を示しており、これより切羽側では軸力が低減している。また、計測値では切羽前方5~6m(位置7~8m)より急激に軸力が増大し切羽前方3m付近でピーク値を示しているのに対して、解析結果では切羽前方の深部からほぼ一定に漸増しており、この区間の分布形状は計測結果と差が生じている。この要因としては、地山と補強部材との付着特性、地山の不連続性等の特性などが考えられる。なお、切羽近傍での軸力の低減傾向は合致している。

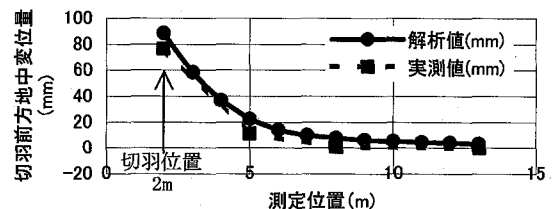


図-12 前方地中変位 (2m掘削時)

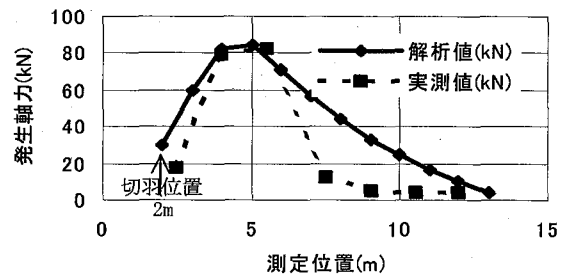


図-13 FIT軸力分布 (2m掘削時)

図-14、図-15に塑性領域図、ひずみ分布図を示す。塑性領域は切羽前方5mまで広がっている。これは、切羽前方地中変位が急増する領域ならびに長尺鏡補強部材の軸力がピーク値まで増加していく領域と一致している。また、塑性領域が分布している切羽前方のひずみ値は0.5~1.0%以上であり、当トンネルの条件では地山が塑性化する

る領域とともに切羽に向かって大きな地中変位を発生し始める境界の値と考えられる。

以上の結果より、切羽前方 4~5m 付近までトンネル掘削による先行緩みが発生し、切羽を押し出す現象が生じていること、また、これより深部にある F I T が引張抵抗力を発現して切羽の押出しを拘束していることがわかる。

なお、長尺補強工の効果を検証するために、施工時に切羽の押出し変位が大きく切羽が不安定化することから追加打設した下半部の F I T の効果についての検討も行った。図-16 に、本解析ケースと、図-11 における下半部の F I T を削除して同様の解析を行ったケースについて、鏡押出し量の分布図の比較を示す。この結果では、下半部の F I T を打設しない場合には、鏡押出し量は最大 150mm であるが、上下半に打設すれば 120mm となり、約 20% の変位低減効果が確認された。

7. おわりに

長尺切羽補強工を施工した際の切羽前方地山の変位測定および補強部材の応力計測を同時に行うことにより、長尺切羽補強工の引張抵抗力が切羽の押し出し変位を拘束する力（前方地山拘束力）として切羽前方の 1 D 付近から発揮ははじめ切羽に近づくにつれ増大すること、ならびに切羽近傍では、その拘束力が低減すると反比例して地山の変位が急激に増大する挙動等が確認された。また、3 次元数値解析により、上記の挙動を変位・部材応力ともに表現できることが確認された。

長尺切羽補強工の部材長やラップ長、打設間隔などの配置パターンを決定するための設計手法を構築するためには、さらに計測データの蓄積をはじめ種々の検討・研究が必要であるものの、これまでほとんどの現場において経験的に施工されてきた長尺切羽補強工の配置パターンに対して、計測・解析を通じて定量的評価に関する有用な情報を得ることができたものと考えられる。

参考文献

- 1) 松尾, 御手洗, 羽馬, 浅井: グラスファイバー製チューブを用いた注入式長尺ボルト工法の開発; 土木学会第 54 回年次学術講演会, 1999. 9.
- 2) 磯崎, 木下, 河村, 西村, 塩川: 断層による影響を受けた不良地山における補助工法の計測について; 地盤工学会関西支部第 3 回最近の地盤計測技術に関するシンポジウム, 2001. 12.

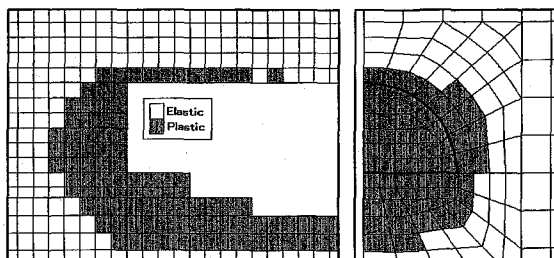


図-14 塑性領域図

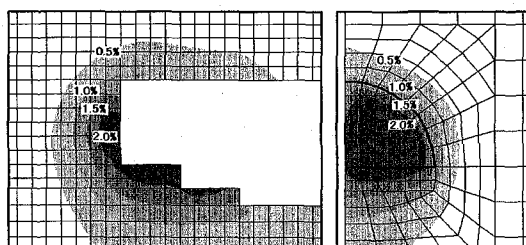


図-15 ひずみ分布図

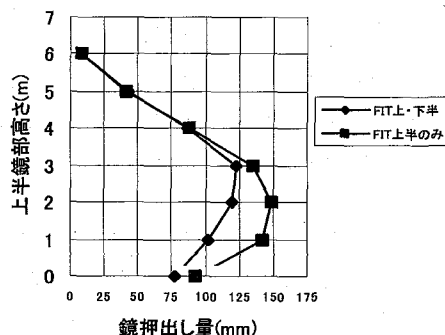


図-16 鏡押出し量分布図