

断層・褶曲作用を受けた脆弱泥岩地山における 変位抑制対策

Countermeasure to prevent Displacement in Weak Mudstone Ground influenced by
Faults and Folds

徳留修¹・大津敏郎²・広瀬雅明³・澤田一也⁴

Osamu Tokudome, Toshirou Ootsu, Masaaki Hirose and Kazuya Sawada

¹正会員 工修 東急建設株式会社 技術本部 (〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14 渋谷地下鉄ビル)

E-mail: tokudome.osamu@tokyu-cnst.co.jp

²工修 財団法人高速道路技術センター 道路技術研究部 道路研究課 (〒100-0013 東京都千代田区霞が
関3-7-2 UBEビル)

³正会員 東急建設株式会社 技術本部 (〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14 渋谷地下鉄ビル)

⁴東急建設株式会社 首都圏本部 土木事業部 (同上)

The excavation method based on early closure of the tunnel section increases at excavating in weak ground by using auxiliary methods for face stabilization. Futago tunnel is a bi-lane tunnel of 1,417m long between Honjyo and Iwaki in Akita. The geology is mainly weak mudstone, and the geological structure indicates the several faults and folds. After the excavation was started, convergence and foot settlement increased with overburden depth. Therefore, it was effective to use the excavation method based on early closure and face reinforcement. This paper reports the process of construction, the examination and the effect of countermeasure to prevent displacement.

Key Words : fault, fold, weak mudstone ground, countermeasure to prevent displacement, early closure, face reinforcement

1. はじめに

トンネル掘削時に大変形が問題となる脆弱地山において、補助工法等により切羽の安定を確保し、掘削断面の早期閉合を図る施工方法が多く用いられるようになってきた^{1)~3)}。

今回報告する二古トンネルは、最大土被りが85m程度と高土被りではないが、多数の断層や褶曲作用を受けた脆弱泥岩地山での施工となり、掘削時の脚部沈下や内空変位の増大が問題となった。そのため、ミニベンチカット工法による早期閉合を基本とした施工方法を採用した結果、変位抑制に有効であった。また、本地山の特徴として、切羽は比較的安定しているが、切羽後方の変状が問題となり、GFRP 切羽補強工を高角度で打設し前方外周地山を補強する工法⁴⁾を用い、有効性が確認された。

本報告では、当工事における変状対策経緯とその

経緯を踏まえた変位抑制対策工の検討および効果について報告する。

2. 工事概要

二古トンネルは、秋田県の南西部、日本海東北自動車道の本荘～岩城間に位置する延長 1,417m の2車線トンネルである。工事概要を以下に示す。

工 事 名：日本海東北自動車道 二古トンネル工事

工事場所：秋田県由利本荘市岩城二古～内道川

延 長：1,417m

内空断面積：67m² (非常駐車帯 82m²)

掘削断面積：93～94m² (非常駐車帯 115m²)

掘削工法：ショートベンチカット工法

ミニベンチカット工法 (早期閉合)

掘削方式：機械掘削

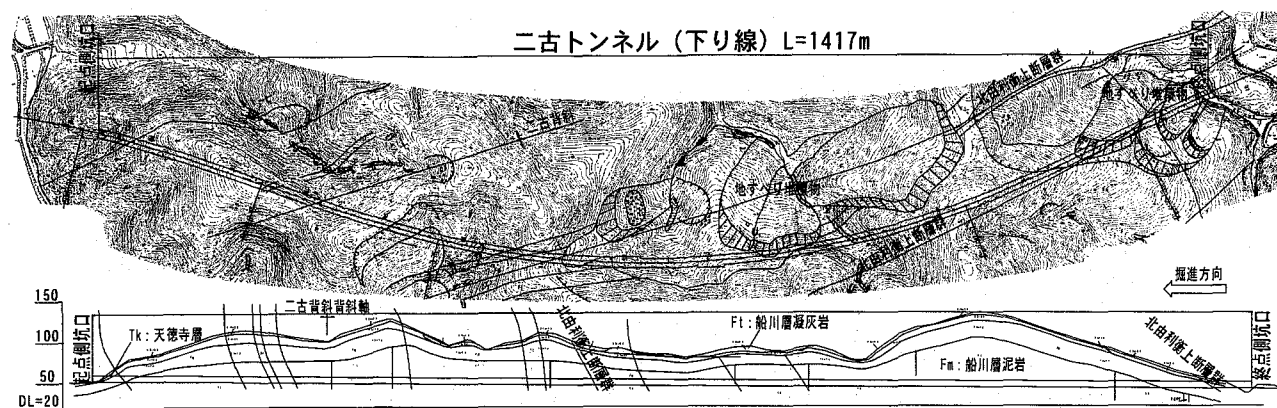


図-1 地質平面・縦断面

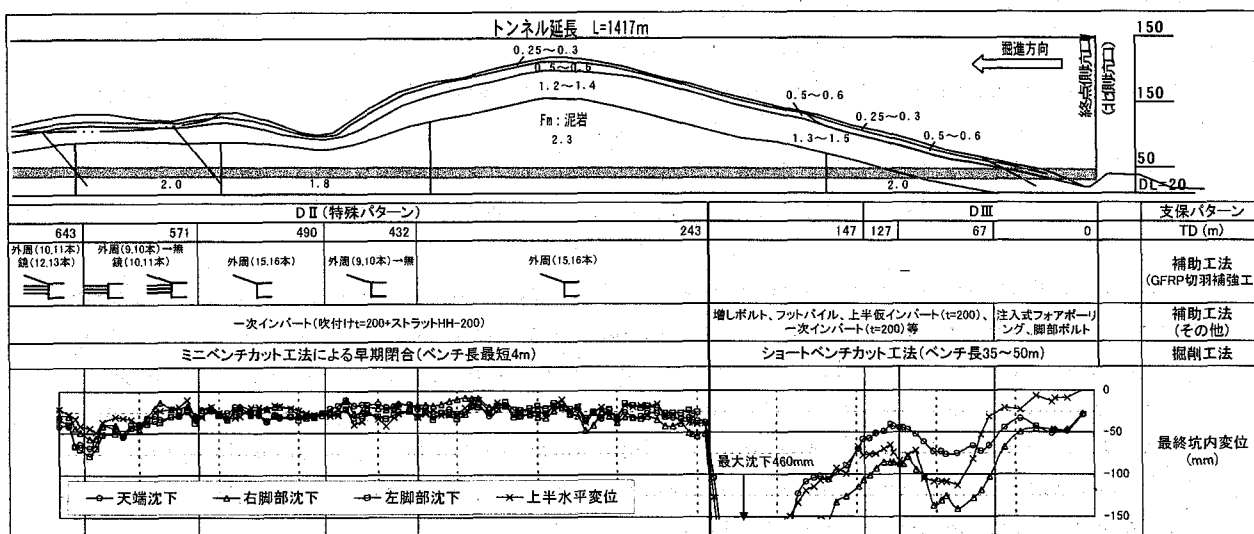


図-2 変状対策経緯と変位計測結果

3. 地形・地質概要

図-1に地質平面・縦断面図を示す。トンネル周辺の地質は、新第三紀中新世後期の船川層泥岩が主体であり、凝灰岩と砂岩を挟在している。地質構造は、南北系の北由利衝上断層群や二古背斜よりなる褶曲が発達し、複雑な構造を呈している。本トンネルはこれらの断層や褶曲と斜交し、地山を構成する船川層泥岩は、これらの影響により破碎変質を受け、部分的に粘土化している。そのため、一軸圧縮強度は、 0.1N/mm^2 以下(破碎変質部)～ 7N/mm^2 以上(健全部)とばらつきが大きい。

4. TD243mまでの変状対策経緯

(1) 坑口～147m区間(土被りH=3～32m)

図-2に坑口から650m区間における変状対策経緯と変位計測結果を示す。本工事では、終点側坑口からショートベンチカット工法により掘削を開

始したところ、TD67m付近から右脚部沈下が増大し、初期沈下速度は 20mm/日 以上となり、7日で 100mm 以上に達した。対策工として、増しボルト、ウィングリブ付き支保工、フットパイル(AGP $\phi 114.3$)、上半仮インバート(吹付け $t=200$)および下半一次インバート(吹付け $t=200$)等を段階的に施工し、変位抑制を図ってきた(図-3)。

この間の実績より、変位抑制には上半仮インバートと下半一次インバートが有効であったため、

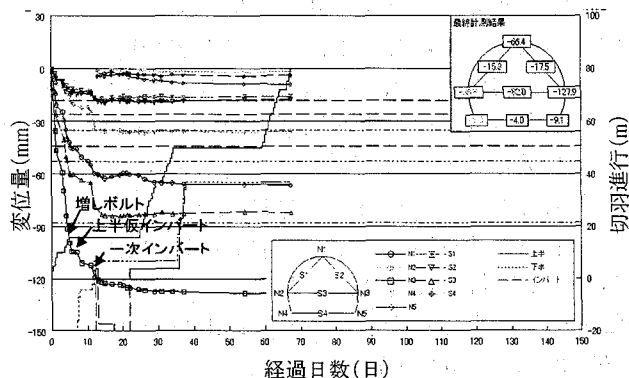


図-3 坑内変位経時変化図(TD77m)

TD127m 以降、これらの対策を掘削サイクルに取り込み施工を進めたところ、TD147m 付近までの沈下は最大 100mm 以内で収束している。図-4 にこの区間の変位抑制対策工を示す。図-5 に示す坑内変位の経時変化によると、上半掘削時には、上半仮インバートにより収束傾向を示し、下半掘削時に再度沈下が増加するが、一次インバート施工により収束傾向を示し、これらの対策工の有効性が確認できる。

(2) TD147～243m区間（土被りH=32m～54m）

TD147m 以降、地質の改善が見られないため、DⅡパターン（鋼アーチ支保工 H-200、上半仮インバート $t=200$ ）により施工を進めた。しかし、土被りが増加するにしたがって上半仮インバートによる変位抑制効果が低下し、TD187m 以降は、上半仮インバート施工後も変位の収束が見られなくなった（図-6）。また、鋼アーチ支保工応力が降伏応力以上となったため、TD215m 以降、支保工サイズを H-150 から H-200 へ、吹付けコンクリート厚を 200mm から 250mm へ変更した。さらに、TD210～243m 区間においては、上半掘削から数日後に仮インバートや吹付けコンクリートにクラックが発生し、ロックボルトプレートの変形も見られたため、TD243m 地点で上半切羽の進行を一時中止し、仮インバートの補修や増しボルトを打設した。

下半掘削時には、一次インバートにより一時的に変位は収束傾向を示していたが、下半切羽の進行に伴い、再度変位が増加傾向を示し、TD225m において右側脚部に最大約 460mm の沈下が発生した。また、鋼アーチ支保工も H-150 区間において一部座屈現象が見られたため、注入式増しロックボルト（全周改良ボルト）による補強を実施するとともに、TD210～243m においては、一次インバート（吹付け $t=200$ ）にストラット H-200 を併用し変位抑制を図った。

写真-1に、TD225mの切羽状況を示す。地質は暗灰色泥岩が主体であり部分的に凝灰岩が貫入している。また、切羽面には断層や褶曲が見られ、断層に沿った泥岩は破碎変質し粘土化しているが、切羽全体は比較的安定していた。

5. TD243m以降の変位抑制対策

(1) 対策工の選定

TD243m までの変位傾向によると、土被りが増加

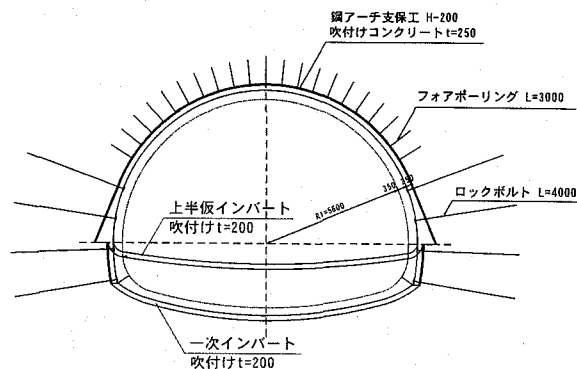


図-4 変位抑制対策工 (TD127～TD243m)

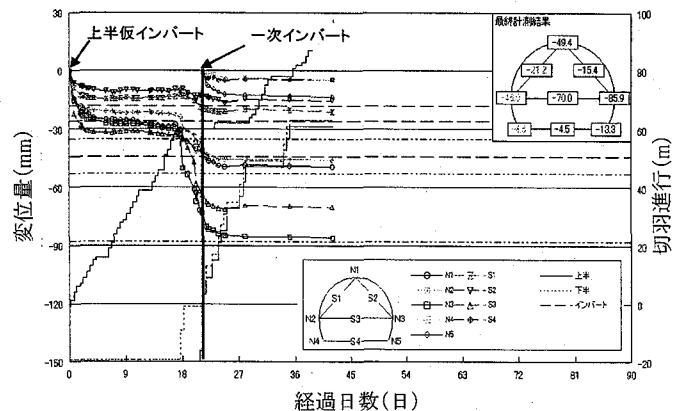


図-5 坑内変位経時変化図 (TD133m)

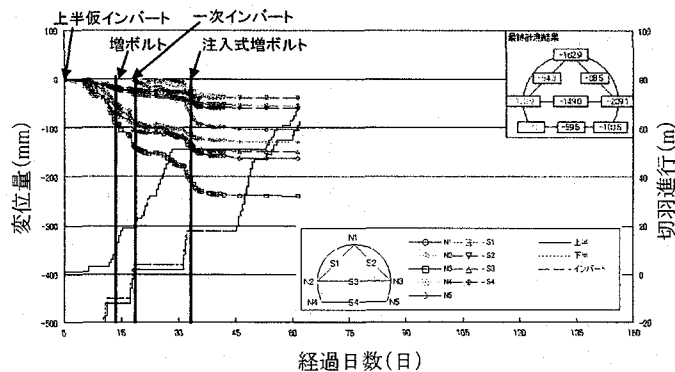


図-6 坑内変位経時変化図 (TD192m)

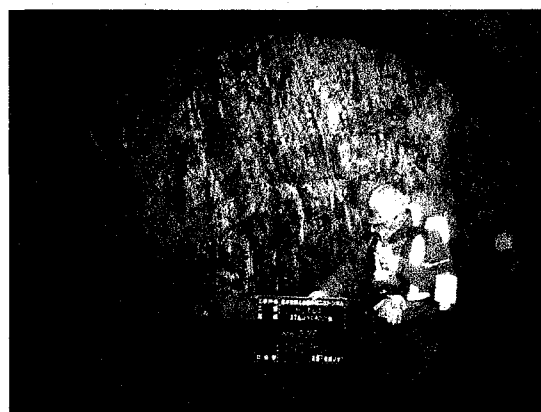


写真-1 切羽状況 (TD225m)

するにしたがって、脚部沈下、天端沈下、上半水平

表-1 FEM による予測解析結果

ケース	CASE-1	CASE-2	CASE-3
概要図			
掘削工法	ショートベンチカット工法	ミニベンチカット工法	ミニベンチカット工法
応力解放率	上半掘削→上半支保工→下半掘削→下半支保工 40% 60% 40% 60%	上下半掘削→上半支保工→下半支保工 40% 20% 40%	上下半掘削→上半支保工→下半支保工 40% 20% 40%
坑内変位	天端沈下 126mm 脚部沈下 194mm 内空変位 125mm	天端沈下 100mm 脚部沈下 120mm 内空変位 39mm	天端沈下 85mm 脚部沈下 89mm 内空変位 15mm
最大鋼アーチ 支保工応力	498N/mm ²	445 N/mm ²	391 N/mm ²
切羽安定性 (みかけ弾性 係数による) ⁷⁾	みかけ弾性係数 $E=2.5 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 「不安定～やや不安定」境界	みかけ弾性係数 $E=2.4 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 「不安定～やや不安定」境界	みかけ弾性係数 $E=6.1 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 「やや不安定」

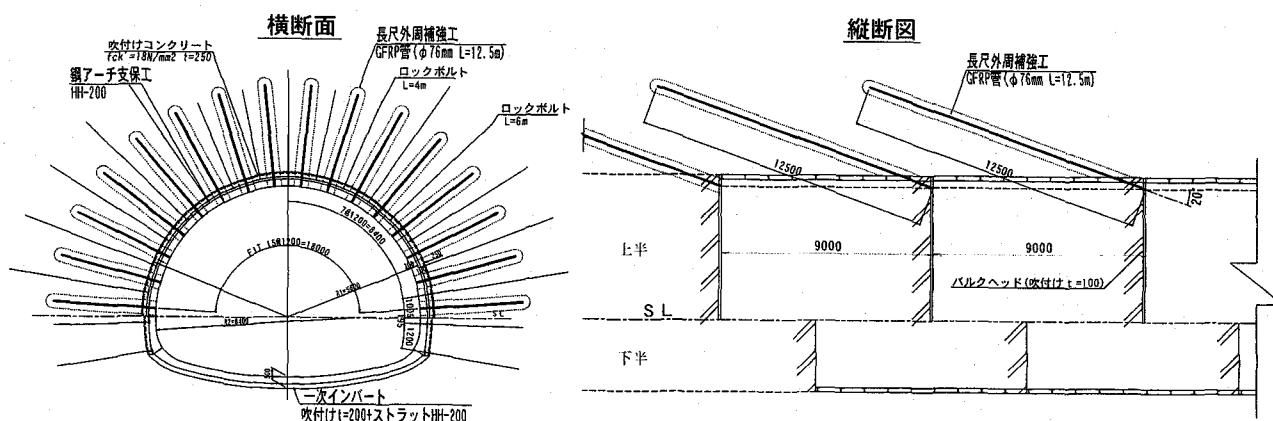


図-7 変位抑制対策工 (TD243m)

変位が増大し、さらに支保工応力が降伏応力以上となるなど、押出し性地山の現象を示した。TD243m以降については、先行水平ボーリング調査結果によると、地質は改善される傾向は見られず、地山強度比も 1.0 以下と小さい値であった。また、TD327m付近までは土被りが増加し、これまで以上に変位および支保工応力の増加傾向が大きくなり、上半仮インバートと下半一次インバートによる掘削パターンでは変位抑制効果が期待できないと予想されるため、対策工の再検討を行った。このような押出し性地山における対策としては、ベンチ長を短くし剛な支保工で早期閉合を図る「早期閉合法」²⁾³⁾、先進導坑により初期地圧を下げてから本坑掘削を行う「いなし工法」⁵⁾、あるいは「多重支保工法」⁶⁾等が考えられる。

本トンネルにおいては、最大土被りが85m程度であり、一般的な押出し性地山に比べて高土被りではないことから、ミニベンチカット工法による早期閉

合が有効と考えられた。適用にあたっては、①支保部材の耐荷力不足、②ベンチ長を短くしたことによる切羽安定性の低下が懸念されたため、二次元FEM解析を用いて、表-1に示す3ケースの対策工について検討を行った。その結果、図-7に示す「ミニベンチカット工法による早期閉合」、「高規格鋼HH-200」および「GFRP切羽補強工」による対策工を採用することにした。なお、GFRP切羽補強工については、トンネル外周の地山補強を目的に、高角度で打設する方法を採用した。注入材は、泥岩中に多数見られる亀裂を接着することを主目的とし、シリカレジンを採用し、注入量は一本あたり11.5kg/mと設定した。

(2) 対策工の施工経緯

a) TD243～571m区間（土被りH=25m～85m）

TD243mより、図-7に示す対策工を実施したところ、坑内変位は50mm以内で収束傾向を示し、変位

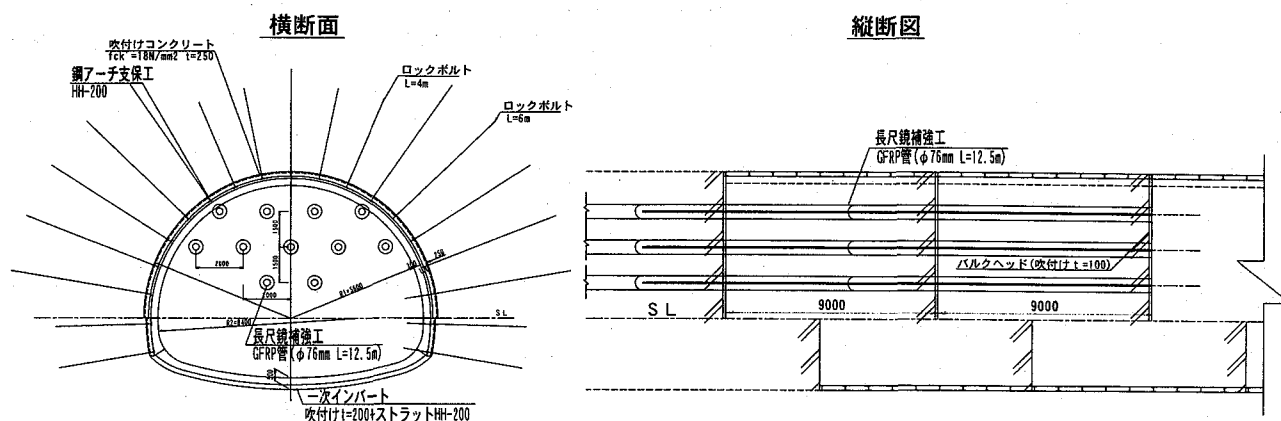


図-8 変位抑制対策工 (TD640m)

抑制効果が見られた (図-2)。しかし、鋼アーチ支保工応力は土被りの大きい区間において、最大 400N/mm^2 程度まで発生し、地山の押出し傾向が大きいことを示している。

b) TD571～643m区間 (土被りH=36m～41m)

前区間において、土被りが最大の85mから25mに小さくなるとともに支保工応力が低下傾向を示し、その反面、鏡面からの剥落が見られるようになったため、GFRP切羽補強工の打設方向を、図-7に示す前方外周を補強するタイプ (長尺外周補強工) から図-8に示す直接鏡面を補強するタイプ (長尺鏡補強工) へ移行を図った。その結果、鏡面の安定性は向上したが、脚部の初期沈下速度が 20mm/日 以上となり、前区間 (10mm/日 前後) の倍程度増加したため、次施工区間から長尺外周補強工を併用した。

6. 変位抑制対策工の効果

TD243m 以降採用した早期閉合を基本とした対策工は、本地山における変位抑制に有効であった。また、本工事においては、GFRP 切羽補強工を採用し、地山状況に応じて、打設角度を変更させた (図-7: 長尺外周補強工, 図-8: 長尺鏡補強工)。長尺鏡補強工については、切羽が不安定となる地山において採用実績が多く、本工事においても鏡安定対策として効果が確認された。一方、長尺外周補強工については、採用実績がほとんど見られないが、本工事での適用結果から、大規模な切羽崩壊防止とともに、坑内変位抑制と支保工応力抑制の効果が見られた。

ここでは、表-2 に示す各変位抑制対策工の実施区間における代表的な計測結果を比較することにより、各対策工の効果を検証する。なお、各計測地点の地山状況は、泥岩が主体であり、亀裂の方向等は若干異なるが、切羽評価点では大きな相違はない。

表-2 計測ケース

計測ケース	TD	変位抑制対策工	土被り
CASE-1	157m	上半仮インバート + 下半一次インバート	37m
CASE-2	490m	早期閉合 (長尺外周補強工)	28m
CASE-3	637m	早期閉合 (長尺鏡補強工)	38m
CASE-4	657m	早期閉合 (長尺外周・鏡補強工)	34m

(1) 全断面早期閉合による効果

図-9～11 に、各計測ケースにおける最大脚部沈下、天端沈下および内空変位の経距変化図をそれぞれ示す。

掘削工法の違いによる変位傾向を見るために、CSAE-1 とその他のケースを比較すると、CASE-1 では、上半を先行し、掘削断面積が小さいため初期変位速度が小さくなるが、下半掘削時には上半仮インバートを撤去しながら施工するため、変位が再度増加傾向を示し、最終変位量は大きくなっている。したがって、最終変位量を小さくするためには、初期変位速度は若干大きくなるが、ベンチ長を短くし、全断面で早期閉合を図ることが有効と考えられる。

(2) 長尺外周補強工の効果

GFRP 切羽補強工の打設方法の違いによる変位傾向を見るために、CASE-2～4 を比較すると、CASE-2,4 は、CASE-3 に比べて、初期変位速度が小さく、閉合 (一次インバート施工) 後の変位収束も早いことが確認できる。とくに、天端沈下と脚部沈下において、その傾向が大きい。これは、長尺外周補強工により、トンネル外周地山を事前補強することによって、変位 (とくに沈下) が抑制されたと考えられる。

図-12 に示す CASE-2 と CASE-3 の鋼アーチ支保工応力の分布を比較すると、CASE-3 は、偏圧の影響により右肩部の応力が 450N/mm^2 程度 (高規格鋼

の降伏応力 440N/mm^2 以上) まで発生しているのに対し、CASE-2 では、応力発生が均等化される傾向

があり、最大応力は 310N/mm^2 程度である。これは、長尺外周補強工による地山補強効果と荷重分散効果によるものと考えられる。

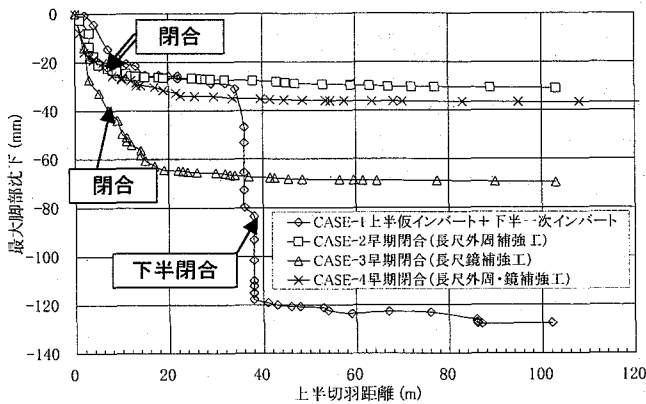


図-9 最大脚部沈下経距変化図

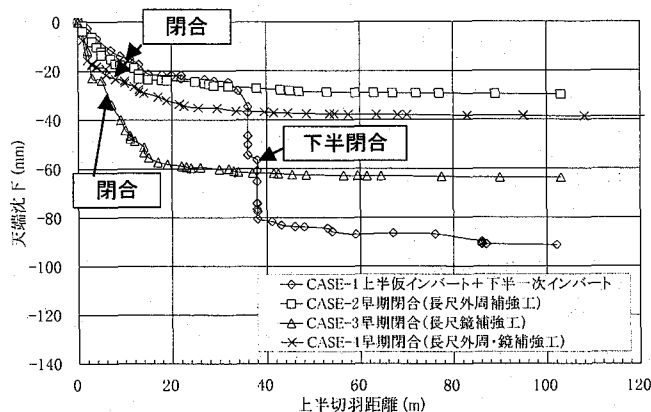


図-10 天端沈下経距変化図

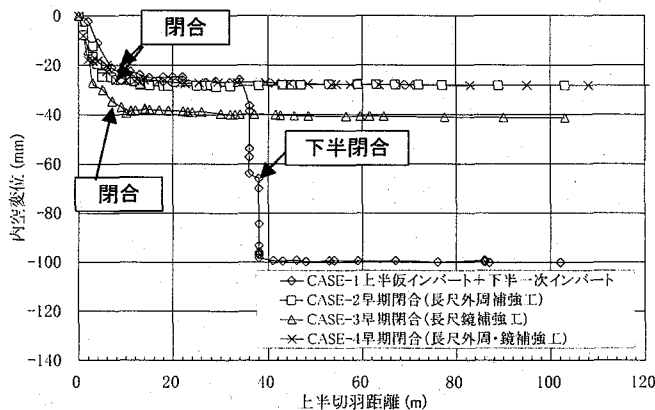


図-11 内空変位経距変化図

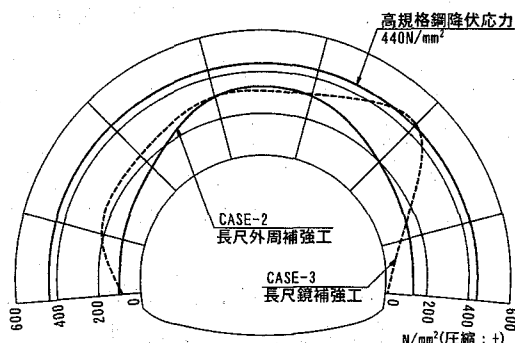


図-12 支保工応力分布の比較

7. おわりに

本工事では、断層・褶曲作用を受けた脆弱泥岩地山において、「ミニベンチカット工法による早期閉合」を基本とした変位抑制対策工を採用するとともに、支保工の高耐力化を図るために「高規格鋼HH-200」および前方地山を補強するために「GFRP切羽補強工」を採用した。本工事における計測結果から以下のような対策効果が確認された。

- ①ミニベンチカット工法による全断面早期閉合は、当地山のような押し出し傾向が見られる地山において変位抑制効果が大きい。
- ②押し出しの大きい地山の場合、従来の鋼アーチ支保工では支保耐力が不足するため、高規格鋼を使用し、高耐力化を図ることが有効である。
- ③GFRP切羽補強工を高角度で打設し、前方外周地山を補強する長尺外周補強工は、坑内変位（とくに沈下）や支保工応力抑制に有効であった。

謝辞：本工事における対策工の検討に際し、二古トンネル対策工検討委員会（委員長：西村和夫・首都大学東京教授）をはじめとする関係各位から多くの貴重なご意見やご支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 高橋浩，進士正人，中川浩二：押し出し性地山を克服するための戦略メニューの提案，トンネルと地下，Vol.36，No.5，pp.25-33，2005。
- 2) 三谷浩二，山戸隆秀，足立宏美，井上博之：加久藤トンネル（Ⅱ期線）における変位抑制工の設計と施工，トンネル工学研究論文・報告集 Vol.12，pp.383-388，2002。
- 3) 高橋浩，谷井敬春，岩井勝彦，桑原秀樹，進士正人，中川浩二：膨張性地山における導坑の適用性に関する実験的研究，土木学会論文集，No.728/VI-58，pp.27-39，2003。
- 4) 牛田猛・戸田一生・村松富士登・尾花敬治：注入式中空長尺GFRP管による大土被りトンネルの変位抑制，第54回施工体験発表会（山岳），pp.65-72，2003。
- 5) 天野角雄，下田哲史，青嶋寿夫，高橋浩：押し出し性泥岩を掘設導坑で貫く，トンネルと地下，Vol.30，No.11，pp.17-23，1999。
- 6) 北川修三：多重支保工法は有力な膨張性地山対策，トンネルと地下，Vol.34，No.2，pp.55-65，2003。
- 7) 桜井春輔 編著：都市トンネルの実際，鹿島出版会，1998。