

大規模蛇紋岩帯に施工した早期閉合トンネルの力学挙動特性

Mechanical behavior of early invert support tunnel excavated in massive serpentinite

秋田 修¹・真弓英大¹・影山久司²・楠本 太³

Osamu Akita, Hidemoto Mayumi, Hisashi Kageyama and Futoshi Kusumoto

¹国土交通省 中部地方整備局 浜松河川国道事務所 (〒430-0811 静岡県浜松市中区名塚町266)

²正会員 清水建設株式会社 名古屋支店 土木部 (〒460-8580 愛知県名古屋市中区錦1-3-7)

E-mail:h.kageyama@shimz.co.jp

³正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)

The Sanen tunnel is proposed as a 4,525m long road tunnel that passes through geological formations comprising serpentinite. Given the rock mass strength ratio ranging from 0.7 to 1.2, large displacement of surrounding ground and excessive deformation of tunnel supports and were expected. For that reason, the design for the tunnel had adopted not only a high-strength support structure based on the thick cylinder theory, but also the full-face excavation method with early-closed invert support.

As a result, the design and construction method enabled safe and sound tunnel construction implying that they were suitable for the squeezing rock mass.

Key Words : serpentinite, squeezing, thick cylinder theory, high strength support structure, early closed invert support

1. はじめに

三遠南信自動車道三遠トンネル（仮称）は、静岡県浜松市から愛知県新城市を結ぶ延長 4525mの二車線トンネルである。トンネル中央付近から静岡県側にかけ、中央構造線主断層破碎帯と地山強度比が0.7～1.2の脆弱な蛇紋岩が分布し、トンネル施工時に、過大な変位や支保構造体の変状、破壊などの発生が危惧された。このため、支保構造体を高耐力化し、計測工 A, B による動態計測のもと早期閉合で施工した。その結果、高耐力支保構造と早期閉合方法の有効性が示されたのと、これによる力学挙動特性が明らかになったので報告する。

2. 工事概要

避難坑を併設する本トンネルは、北側の細川断層と南側の中央構造線主断層に分岐する中央構造線擾乱帯を通過し、静岡側引佐工区では、これに大規模蛇紋岩帯が連続する（図-1）。トンネル工事は、北側

の鳳来工区と南側の引佐工区の2工区に分割して施工を行っており、複雑な地層の掘削であるので、両工区とも避難坑を先行させ、地質の事前確認と地山性状を評価し、本坑の支保構造設計と掘削方法の選択等に反映させた。

3. 地質と地形概要

引佐工区の静岡側坑口から1600m付近までは、三波川変成岩類の泥質片岩、砂質片岩、緑色片岩が分

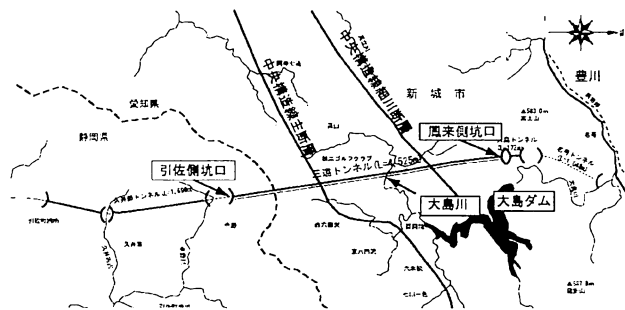
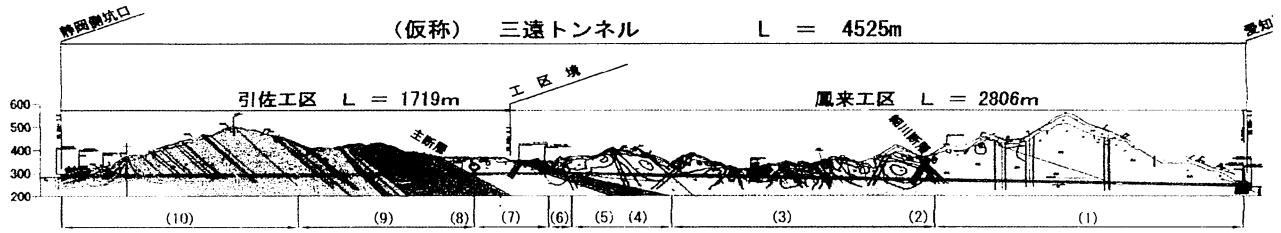


図-1 (仮称) 三遠トンネル位置



(10)結晶片岩類,(9)蛇紋岩・角閃岩,(8)主断層,(7)砂岩・頁岩,(6)蛇紋岩,(5)凝灰岩,(4)泥岩,(3)カタクレーサイト,(2)細川断層,(1)火山岩類
図-2 地質縦断面

布する。900m付近には、蛇紋岩化した部分を含む角閃岩、1200～1500m付近は蛇紋岩、以奥の1720m付近までは中央構造線主断層破碎帯と七郷一色層頁岩・砂岩が分布する（図-2）。蛇紋岩は、塊状岩を含むが、葉片状、粘土状が主体であり、一軸圧縮強度は $q_u=2.2\sim 2.7\text{N/mm}^2$ 、土かぶりは $H=100\sim 130\text{m}$ 、地山強度比は $0.7\sim 1.2$ で代表される。中央構造線主断層破碎帯は、幅約75mの蛇紋岩の破碎帯である。坑口地すべり区間を除く三波川変成岩類と七郷一色累層は、比較的良好な岩盤であり、施工上の課題はない。また、これら区間での切羽集中湧水はない。

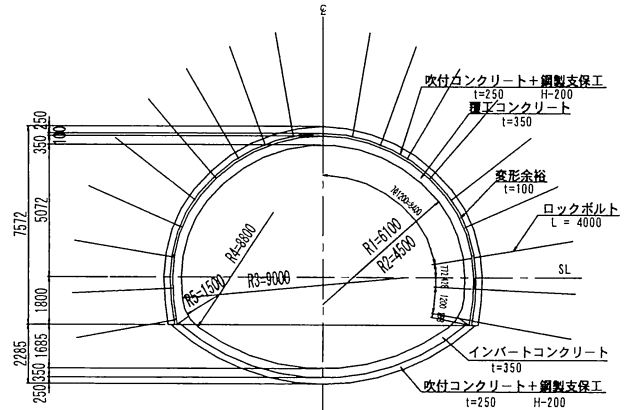


図-3 本坑支保構造概要（蛇紋岩・主断層）

4. 本坑掘削

(1) 支保構造と補助工法

粘土状・葉片状蛇紋岩は、脆弱で押し出し性を示すので、「高強度吹付けコンクリートを主要支保部材とする高耐力支保構造を設計し、早期閉合による支保の軸力閉構造化で支保耐力の早期発現と掘削影響域の深部進展を抑制する」を基本とし、厚肉円筒理論解を用いて押し出し性土圧とバランスできる必要支保耐力を算定¹⁾し、これを参考にして支保構造仕様を定めた（図-3、表-1）。

補助工法は、安全作業を確保するための鏡吹付け工を基本とし、支保施工までの間の掘削面の自立を保持し、設計品質の確保と施工を確実にするために、注入式フォアボーリングと注入式長尺鋼管フォアパイリングを地質性状と分布規模に応じて選択する（表-2）。

(2) 施工方法

断面閉合の施工単位は3mとし、上半切羽から7～8mの範囲内で、上・下半3m進行毎に断面閉合する補助ベンチ付き全断面掘削である（図-4）。

(3) 計測工概要

本坑支保構造仕様の照査とトンネル挙動特性の把握を主目的に、計測工A,Bを実施する。計測工A断面は、トンネル進行方向20m間隔に設け、1断面当たり

表-1 本坑支保構造仕様（蛇紋岩・主断層）

断面区分	DⅡ-1	DⅡ-2
葉片状・粘土状規模	小規模	中・大規模、主断層
地山強度比	$1.0 \leq$	< 1.0
1掘進長	1.00m	1.00m
変形余裕量	10cm	10cm
支保・閉合	吹付け厚（圧縮強度）	25cm (18N/mm ²)
	鋼製支保工	H-200 (SS400)
	ロックボルト本数	上・下半19本 (L=4m), 170kN

表-2 補助工法仕様（本坑）

注入式FP	L=3.0m, 19本/断面 (7-チ部120°, p=600)
注入式長尺鋼管FP	Φ114.3, t=6, L=12.5m 29本/断面 (7-チ部120°, p=450)
先受け工注入材	シリカゼン, 設計注入量 (10kg/m/本)
鏡吹付け	t=10cm, 上半切羽鏡

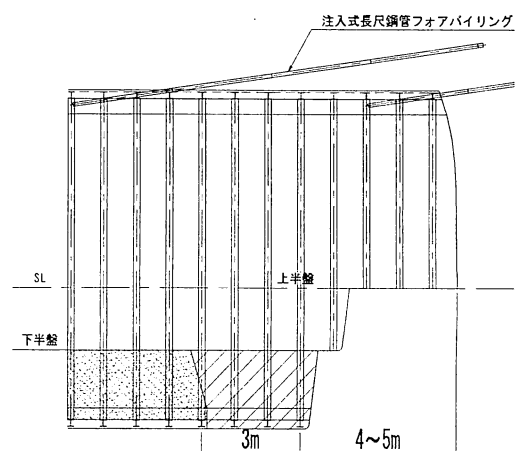


図-4 本坑掘削方法（早期閉合）

測点数は5点とし、三次元変位計測システムを用いて、吹付けコンクリート表面に取付けた測点の鉛直・水平方向絶対変位を12～24時間毎に測定する。計測工Bは、図-5に示すように、支保部材応力測定を基本とする計器配置とし、計測断面は蛇紋岩規模に応じて設ける。吹付けコンクリート応力測定(T)は、最小読取 0.1N/mm^2 のコンクリート有効応力計を使用し、鋼製支保工応力測定(S)は最小読取 1×10^{-6} のひずみゲージを使用する。ロックボルト軸力測定(M)はロックボルト軸力計を使用し、背面土圧測定(R)は地圧計を使用する。

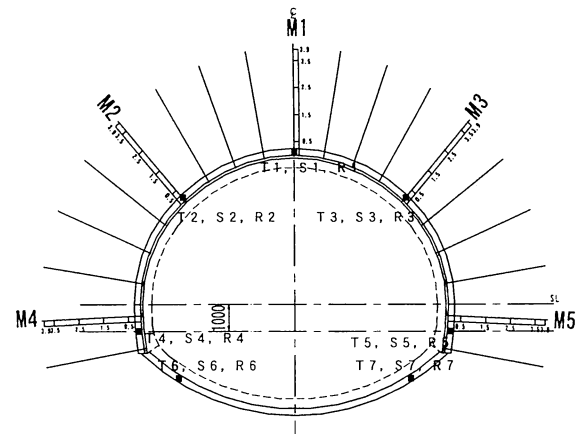


図-5 計測工B計器配置概要（本坑）

(4) 施工状況

蛇紋岩と主断層破碎帯区間の開始測点と規模、土かぶり厚と地山性状および計測工B断面位置は、表-3、表-4と図-6にまとめて示す。

蛇紋岩①の施工では、先行避難坑での分布幅は小規模であったので、圧縮強度 18N/mm^2 のDⅡ-1で施工した。この以奥の中規模、大規模、主断層破碎帯では、蛇紋岩①の支保構造部材に高い軸応力が発生したので、DⅡ-2で施工した。粘土状の蛇紋岩①では、切羽の自立度は高かったので、先受け工なしで施工した。蛇紋岩②、③と主断層破碎帯では、それぞれ延長18m、99m、63m間で注入式長尺先受け工を採用し、切羽の安定を確保しながら施工した。また、主断層は、粘土状蛇紋岩の中に出現し、硬軟差を有する多種の岩盤が混じりあい分布する不均質な混成岩を呈していた。（写真-1）。

表-3 蛇紋岩規模と性状（本坑）

岩種区分	蛇紋岩①	蛇紋岩②	蛇紋岩③
断面区分	DⅡ-1	DⅡ-2	DⅡ-2
開始測点	No. 427+1	No. 439+8	No. 443+6
規模（幅）	小(25m)	中(38m)	大(294m)
土かぶり厚	133m	126m	98m
地山性状	粘土状	粘土状	葉片状
計測工 B	No. 427+11	No. 439+19	No. 447+8

表-4 主断層破碎帯規模と性状

岩種区分	本坑	避難坑
断面区分	DⅡ-2	DⅡ-P
開始測点	No. 458+0	No. 459+9.5
規模（幅）	大規模(76m)	大規模(55m)
土かぶり厚	71m	74m
地山性状	粘土状	粘土状
計測工 B	No. 460+13	No. 461+2.5

(5) トンネル変位

蛇紋岩と主断層区間に設けた計測工B断面位置でのトンネル変位の最大値は、この直近の泥質片岩のものとともに、図-7に示す。これから、以下のことが分かる。

①中規模・大規模蛇紋岩区間では、連続して早期閉合が行われているので、天端沈下、内空変位ともに、泥質片岩区間（DⅠ）と同等レベルに抑制され、10mm以下の天端沈下、25mm以下の内空側への内空変位となり、変形余裕量100mmの範囲内で収束する。

②主断層破碎帯区間では、不均質な地山物性分布の影響を大きく受け、天端部は7mm上方向に変位し、内空変位は38mm内空側に変位する。

(6) 挙動特性

トンネル変位が収束するのに要した日数と切羽距離は図-8に示し、小規模区間での吹付けコンクリート軸応力の経時変化は図-9に示す。これらから、以

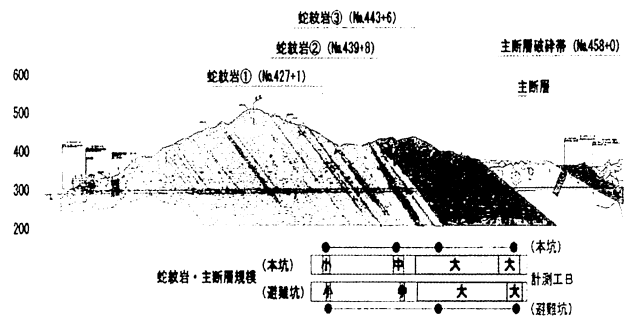


図-6 蛇紋岩・主断層位置と分布規模



写真-1 主断層切羽状況（本坑）

下のことが分かる。

①圧縮強度が 36N/mm^2 の中規模，大規模蛇紋岩区間のトンネル変位は，切羽通過 2.8 ヶ月後，切羽が 250m 進行すると収束する。 18N/mm^2 の小規模区間では，この圧縮強度の違いによる影響を含むが，5.3 ヶ月後，切羽距離は 450m に延びる。

②トンネル変位の収束時期は，天端沈下より内空変位の方が，蛇紋岩規模では，大規模より小規模の方が遅くなる。

③主断層区間では，この計測工 B 断面の 25m 奥側に，頁岩・砂岩の層境が出現するので，泥質片岩と同等レベルの収束性を有す。

④吹付けコンクリートに発生する軸応力は，トンネル変位収束後も微増減し，収束するのに 10 ヶ月，切羽距離で約 700m を要し，トンネル変位の収束時間に比べて約 2 倍多くかかる。

(7) 支保効果

吹付けコンクリート軸応力と鋼製支保工縁応力 (+M) は，図-10，図-11 に示す。吹付けコンクリート軸力を支保部材軸力で除した吹付けコンクリート分担率は図-12 に示し，測線別ロックボルト軸力の最小値は図-13 に示す。これらから，以下のことが分かる。

①吹付けコンクリート軸応力の最大値は，天端部に発生し， 12N/mm^2 の圧縮であり，圧縮強度 36N/mm^2 の範囲内で安定する。 SL 部は，天端部の 0.2~0.8 倍である。インバート部は，最も小さく発生し， $1\sim4\text{N/mm}^2$ の圧縮である。

②鋼製支保工縁応力の最大値は，降伏応力を超えて天端部に発生し， 270N/mm^2 の曲げ圧縮となり，ヤング係数の高い鋼製支保工は降伏しやすい。

③吹付けコンクリートは，トンネル支保構造体に発生する軸力の 65~85% を分担し，主要支保部材として機能する。

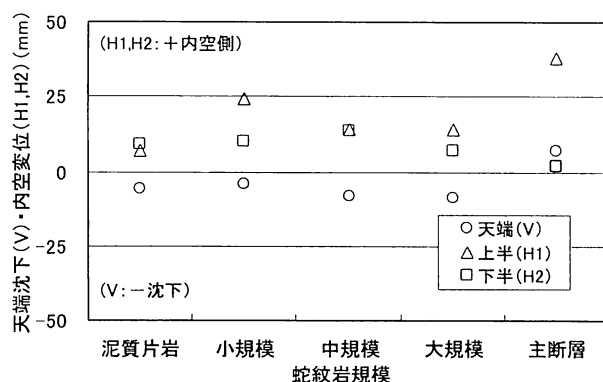


図-7 トンネル変位の最大値

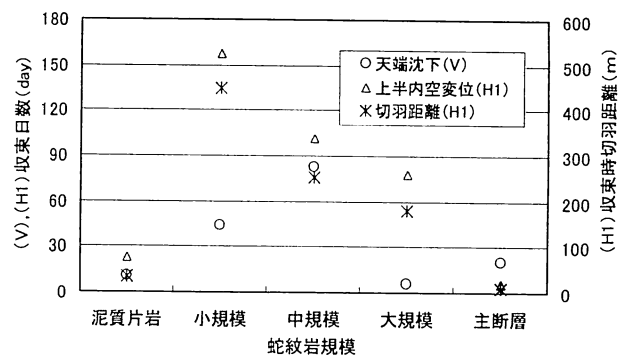


図-8 トンネル変位の収束日数・切羽距離

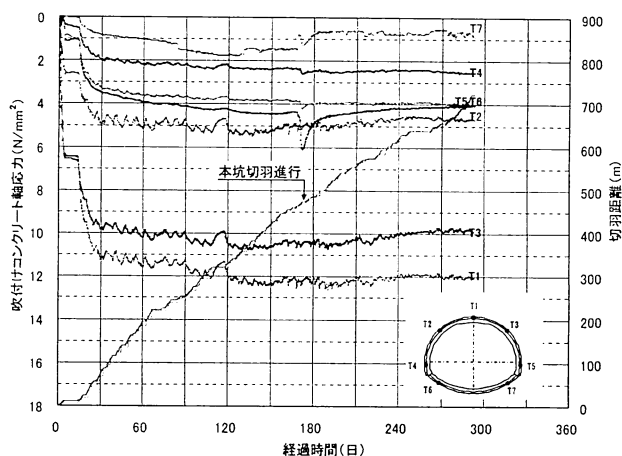


図-9 吹付けコンクリート軸応力経時変化（小規模）

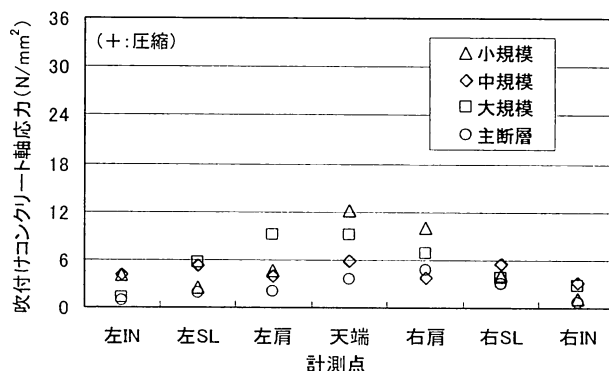


図-10 吹付けコンクリート軸応力（本坑）

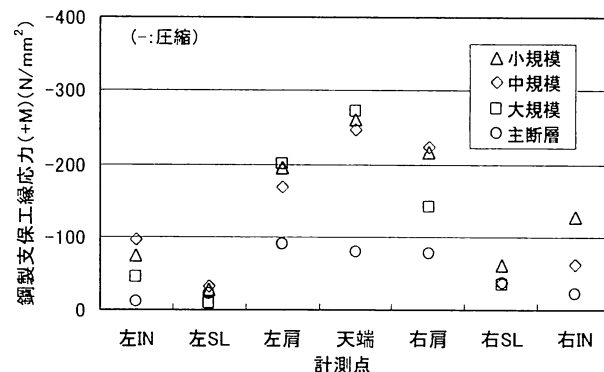


図-11 鋼製支保工縁応力 (+M, 本坑)

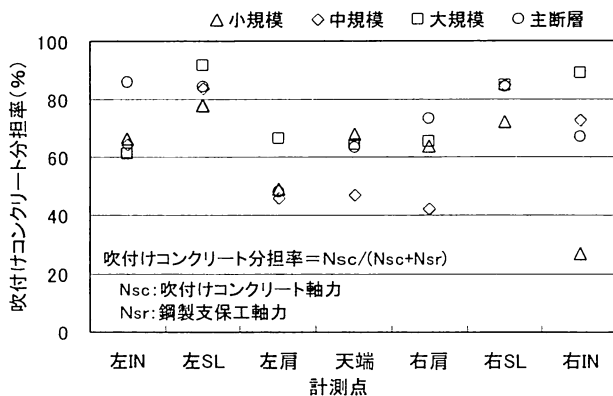


図-12 吹付けコンクリート軸力分担率（本坑）

④測線別ロックボルト軸力の最小値は、中規模の天端部測線で21kNの圧縮、小規模右SLで16kNとなり、蛇紋岩分布規模に係わらず、早期閉合による内圧効果により、1～5kNの圧縮力が発生する。

(8) 支保構造体の安定性

吹付けコンクリート軸応力の最大値から収束値を控除し、これを最大値で除した吹付けコンクリート軸応力の低下率は図-14に示す。これから、以下のことが分かる。

①早期閉合の吹付けコンクリートに発生する軸応力は、蛇紋岩の分布規模に係わらず、時間経過とともに緩和する。

②吹付けコンクリート軸応力の低下率は2～10%である。応力レベルの高い天端部では、低下率のばらつきは小さい。

③圧縮強度が18N/mm²の小規模区間の低下率は、インパート部で35%、左肩部で15%と大きく低下する。

5. 避難坑掘削

(1) 施工方針

避難坑工事は、確実な施工とともに本坑での蛇紋岩や主断層破碎帯の出現位置と分布規模の推定および力学挙動特性の事前把握などが課されており、本坑掘削に約3ヶ月、切羽距離で約300m先行させる。また、避難坑工事では、当初設計時の地質縦断図を基にして、想定層境位置の手前から、水抜きを兼ねた先進ボーリング調査を実施し、このボーリングコア観察により、避難坑での蛇紋岩や主断層破碎帯の出現位置と規模を特定し、高耐力支保構造への変更準備が事前にできるようにする。

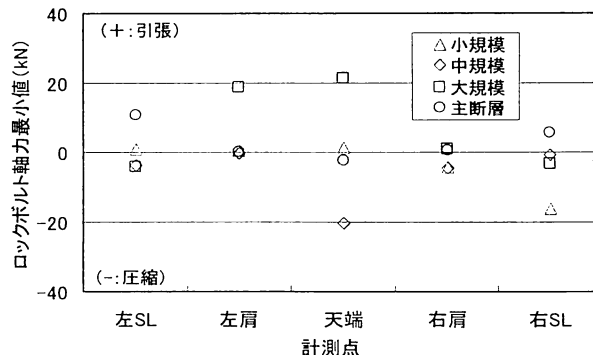


図-13 測線別ロックボルト軸力最小値（本坑）

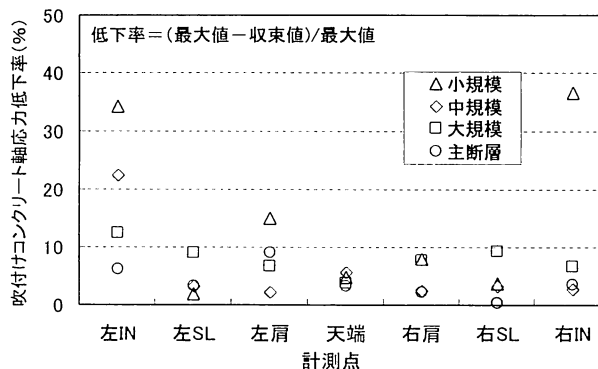


図-14 吹付けコンクリート軸応力低下率

(2) 支保構造と補助工法

本坑の場合と同様、標準支保パターンによる安定確保は困難であるので、押出し性土圧とバランスできるような高耐力支保構造仕様とする(図-15、表-5)。

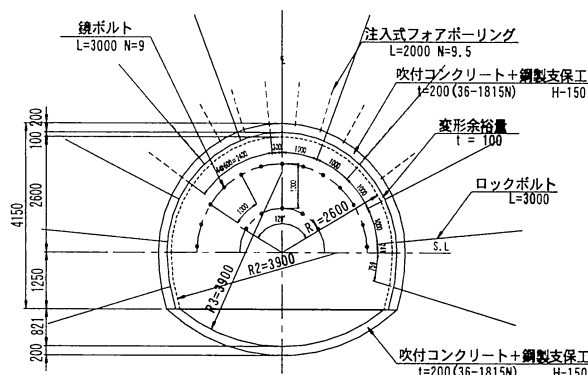


図-15 避難坑支保構造概要（蛇紋岩・主断層）

表-5 避難坑支保構造仕様（蛇紋岩・主断層）

断面区分		D II-P
地山性状		葉片状、粘土状
1掘進長		1.00m
変形余裕量		10cm
支保・閉合部材	吹付け厚(圧縮強度)	20cm (36N/mm ²)
	鋼製支保工	H-150 (SS400)
	ロックボルト	11本 (L=3m), 170kN

補助工法は、鏡吹付けを基本とし、支保施工までの間の掘削面の自立を保持し、設計品質の確保と施工を確実にするために、注入式フォアポーリングと鏡ボルトを地質性状に応じて選択する（表-6）。

(3) 施工方法

断面閉合の施工単位は1mとし、切羽から2～3m後方で、掘削進行1m毎に断面閉合するレール方式の全断面掘削である（図-16）。

(4) 計測工概要

避難坑支保構造仕様の照査とトンネル挙動特性の把握を主目的に、支保部材応力測定のため計測工Bを実施する（図-17）。また、計測工A,B計測要領は、本坑の場合と同様である。

(5) 施工状況

蛇紋岩と主断層破碎帯区間の開始測点位置と規模、土かぶり厚と地山性状および計測工B断面位置は、表-7、表-4にまとめて示す。先行避難坑のトンネル挙動特性は不明であるので、圧縮強度を36N/mm²とするDⅡ-Pの早期閉合で施工した。蛇紋岩①の地山性状は粘土状であり、また大規模蛇紋岩③は葉片状であるが、切羽の自立度は高かったため、補助工法なしで施工した。蛇紋岩②と主断層では、切羽自立度が低かった施工延長4m、28m間で、注入式フォアポーリングを採用し、切羽の安定を確保しながら施工した。主断層の切羽性状は、写真-2に示すように、本坑と同様である。

(6) トンネル変位

避難坑掘削後と本坑掘削後の蛇紋岩と主断層破碎帯区間に設けた計測工B断面位置での避難坑変位の最大値は、図-18に示す。これから、以下のことがわかる。

①避難坑掘削後の天端は最大2.3mm上方向に変位し、内空変位は地山側に7.2mm拡大するが、早期閉合により、天端沈下、内空変位ともに、変形余裕100mmの範囲内で収束する。

②トンネル中心間距離は約25m離れているが、本坑掘削影響として、天端は最大4mm沈下し、内空変位は内空側に最大7mm縮小する。

(7) 支保効果

本坑掘削影響を受けた吹付けコンクリート軸応力と支保部材軸力に対するこれの分担率は、図-19、図-20に示す。避難坑掘削後に対する避難坑後吹付け

表-6 補助工法仕様（避難坑）

注入式FP	L=2.0m、9.5本/断面（7-チ部120°、p=600）
先受け注入材	シリジン、設計注入量（10kg/m/本）
鏡吹付け	t=5cm、切羽鏡
鏡ボルト	L=3.0m、鋼管膨張型、9本/断面（p=1.0m）

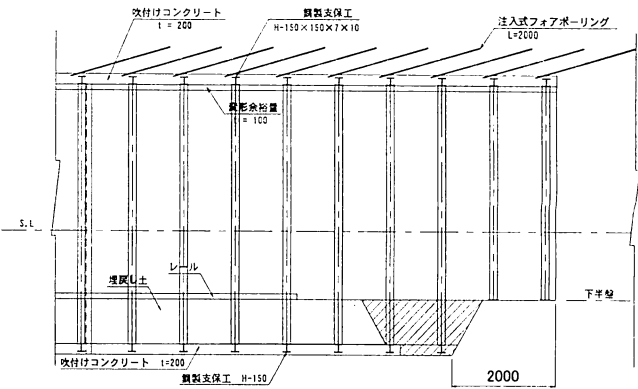


図-16 避難坑掘削方法（早期閉合）

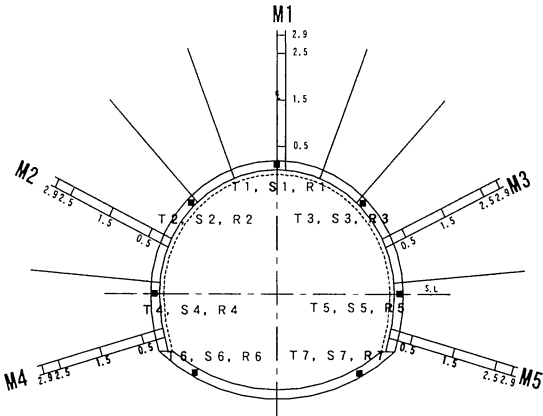


図-17 計測工B計器配置概要（避難坑）

表-7 蛇紋岩規模と性状（避難坑）

岩種区分	蛇紋岩①	蛇紋岩②	蛇紋岩③
開始測点	No. 427+14	No. 440+13	No. 443+13
規模（幅）	小（15m）	中（16m）	大（303m）
土かぶり厚	122m	-	103m
地山性状	粘土状	粘土状	葉片状
計測工B	No. 428+1	-	No. 447+8



写真-2 主断層切羽状況（避難坑）

コンクリート軸応力増分比は、図-21 に示す。また、本坑掘削後ロックボルト軸力の測線内最大値と最小値をプロットすると図-22 のようになる。これから、以下のことが分かる。

①吹付けコンクリート軸応力の最大値は 9N/mm^2 、主断層区間では 4.4N/mm^2 の圧縮となり、圧縮強度 36N/mm^2 の範囲内で安定する。

②吹付けコンクリートは、支保部材発生軸力の 60～80% を分担する。主断層のアーチ部から右 SL 部にかけて、不均質な物性分布の影響を受け、鋼製支保工が 75～85% を分担する。

③避難坑掘削後の吹付けコンクリート軸応力は、本坑掘削影響を大きく受け、 $-2.3\sim 69$ 倍に増減し、安定する。

④ロックボルト軸力は、全測線で圧縮力が発生し、SL 部では最大 65kN になり、早期閉合による内圧効果が発現する。

6. 力学パラメータ照査

(1) 本坑必要支保耐力

粘土状、葉片状蛇紋岩は、地山強度比は 0.7 程度と低く、脆弱であるので、掘削影響域（H:掘削影響がおよんだ範囲）の土かぶり相当土圧として $H=60\text{m}$ を想定¹⁾し、厚肉円筒理論解を用いて本坑支保耐力を算定した（図-23）。これを基にして、吹付け厚 25cm 、圧縮強度 36N/mm^2 の高耐力支保構造を設計し、早期閉合の補助ベンチ付き全断面掘削で施工した。その結果、吹付けコンクリート軸応力の最大値は、これの約 $1/3$ の 12N/mm^2 が発生し、支保構造体の力学的安定は確保できた。また、本坑掘削影響域として、掘削面から約 20m 以深におよぶことが推察された。

(2) 作用土圧

支保構造体に作用する換算土圧 P_c 、 P_s は、吹付けコンクリートと鋼製支保工に発生する軸力 N_c 、 N_s をトンネル半径 r で除して概算すると、本坑では $0.25\sim 0.50\text{N/mm}^2$ 、避難坑では $0.24\sim 0.68\text{N/mm}^2$ となる（図-24）。これは、換算鉛直土圧 σ_v の 14～30%、土かぶり $15\sim 30\text{m}$ の土圧に相当する。

(3) 掘削影響域

早期閉合で高耐力支保構造を施工した脆弱な蛇紋岩における先行避難坑への本坑掘削影響は、本坑と避難坑のトンネル中心間距離は約 25m 離れているが、避難坑吹付けコンクリート軸応力の経時変化として図-25 に示す。これから、以下のことが分かる。

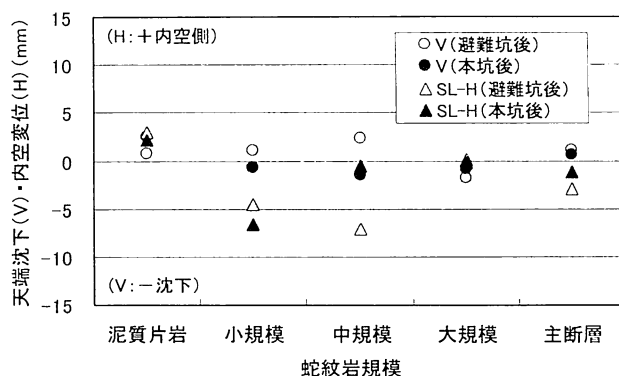


図-18 避難坑変位（避難坑掘削後と本坑掘削後）

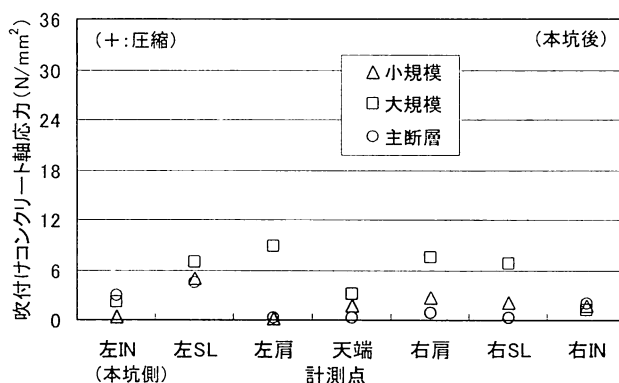


図-19 吹付けコンクリート軸応力（本坑後）

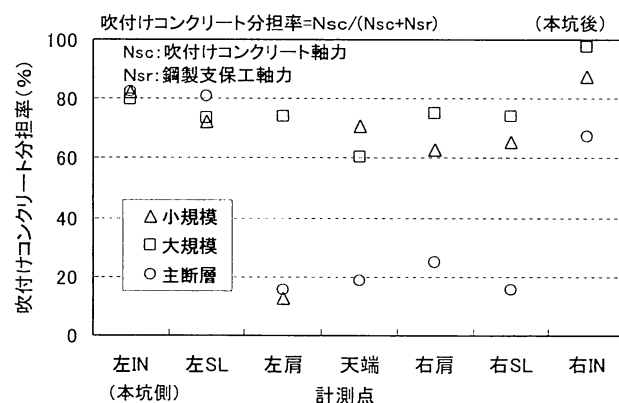


図-20 吹付けコンクリート分担率（本坑後）

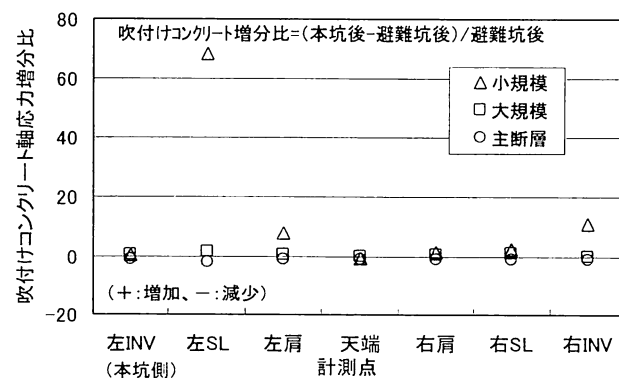


図-21 吹付けコンクリート軸応力増分比

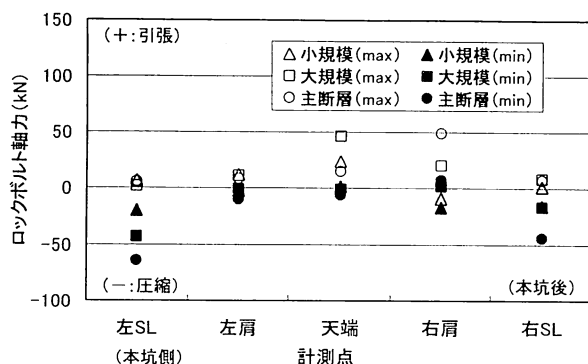


図-22 ロックボルト軸力（測線内最大・最小値）

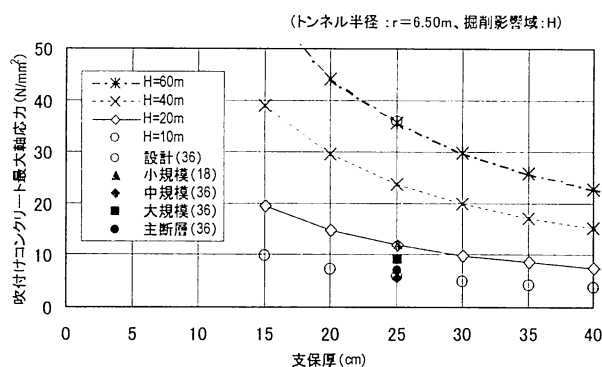


図-23 必要支保耐力と吹付けコンクリート最大軸応力

①本坑掘削影響は、本坑切羽が避難坑計測工B断面の前方約140m位置に近づくと現れはじめ、SL付近測点のものを除くと、本坑切羽通時に最大値を示し、避難坑施工時の約2倍の 9N/mm^2 に増加する。本坑切羽通過後は、吹付けコンクリート軸応力は減少しながら収束傾向を示し、本坑切羽が約400m進むと収束する。

②本坑周方向地中応力場（ σ_θ ）と同方向の避難坑両肩（T2, T3）とSL部（T4, T5）の吹付けコンクリート軸応力は、本坑掘削影響を大きく受け増加するが、本坑半径方向地中応力場（ σ_r ）と同方向の避難坑天端（T1）と両インバート部（T6, T7）では、増加傾向はみられない。このことから、避難坑周辺地山の地中応力は、本坑支保による内圧力により、 σ_r が卓越する再配分応力を受けたからと推察できる。

③本坑切羽通過後の避難坑吹付けコンクリート軸応力は、避難坑掘削時と同様の分布モードで推移し、避難坑周辺地山の物性分布に大きく支配される。

以上から、本坑掘削影響域の拡がりとは、本坑掘削面から約20m以深におよび、本坑支保構造体のグラウンドアーチ域は避難坑を含めて形成されることが示された。

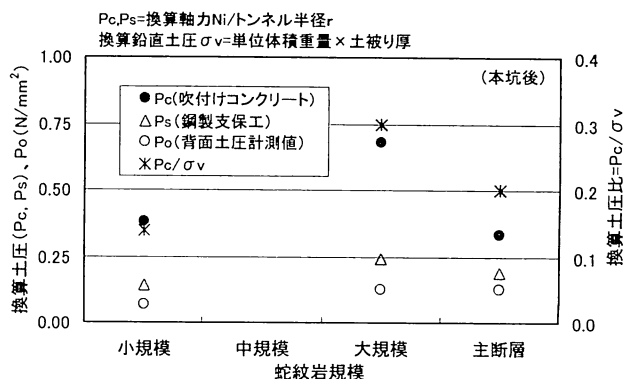


図-24 換算作用土圧（本坑）

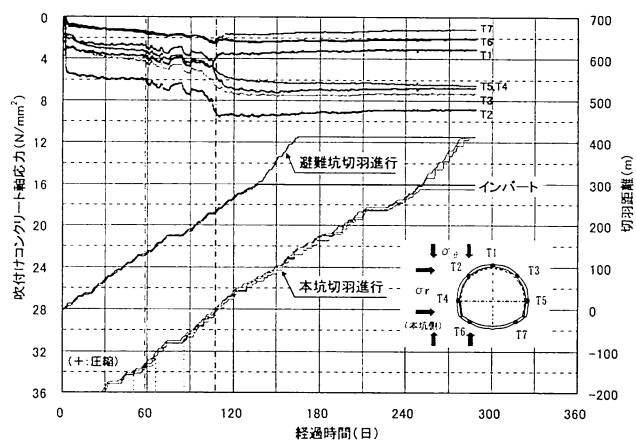


図-25 吹付けコンクリート軸応力経時変化（避難坑，蛇紋岩③）

7. おわりに

押出し性土圧に見合う高耐力支保構造を設計し、早期閉合による補助ベンチ付き全断面掘削で情報化施工した。これは、脆弱な蛇紋岩帯と中央構造線主断層破碎帯区間のトンネル施工を確実にし、無事通過でき、トンネル設計・施工方法の有効性が示された。また、これによる力学挙動特性が明らかになったのと脆弱地山の力学パラメータとする必要支保耐力、作用土圧と掘削影響域などの基礎データと知見をえた。今後は、これらのデータを基にして数値シミュレーションを行い、特殊地質条件下のトンネル設計、施工技術として高精度化を進める予定である。

最後に、「三遠・佐久間道路路施工検討委員会（浜松河川国道事務所）」今田徹委員長をはじめ委員会委員ならびに関係各位より、貴重なご意見を頂いたことをここに記して、感謝する次第である。

参考文献

- 1) 楠本太，恩田雅也，上岡真也：押出し性地山における大断面トンネルの力学パラメータに関する考察，土木学会第60回年次学術講演会，第Ⅲ部門，2005。