

脆弱泥岩地山における超大断面トンネルの施工実績

CONSTRUCTION OF A LARGE AND FLAT CROSS SECTION TUNNEL ON VERY WEAK MUDSTONE GROUND

菊池 晋¹⁾・米沢 幸治²⁾・竹間伸司³⁾・橋詰 清⁴⁾・玉井靖広⁵⁾
Susumu KIKUCHI, Yukiharu YONEZAWA, Shinji CHIKUMA,
Kiyoshi HASIZUME, Yasuhiro TAMAI

The Fujieda NO. 2 tunnel is located in the west of Fujieda city. It is a Large cross section, flat shaped and shallow depth tunnel. So various problems were expected by the geological feature of this tunnel, which is located in the very weak mudstone ground.

In this paper, we report about the tunnel supporting methods, double steel ribs support method and advanced 2 side pilot tunnels and a central top pilote tunnel excavation method, that we adopted from analysis and investigation result about stability of this tunnel, and analysis based on the measurement result when we executed tunnel excavation.

Key Words: Mudstone of neogene, Large and flat cross section tunnel, Double steel ribs support method, a central top pilot tunnel, 2 side pilot tunnels

1. はじめに

藤枝第二トンネルは静岡県藤枝市の西部に位置し、延長318m(下り線)、305m(上り線)であり、静岡県内の第二東名高速道路建設で計画された71本のトンネル(上下線)の中でも短いトンネルに属する。

土被りは最大で54mであり、トンネル直径(約20m)の3倍にも満たない、いわゆる低土被り下の超大断面トンネルである。

地質は新第三紀中新世の大井川層群に属し、海底地すべりによる乱堆

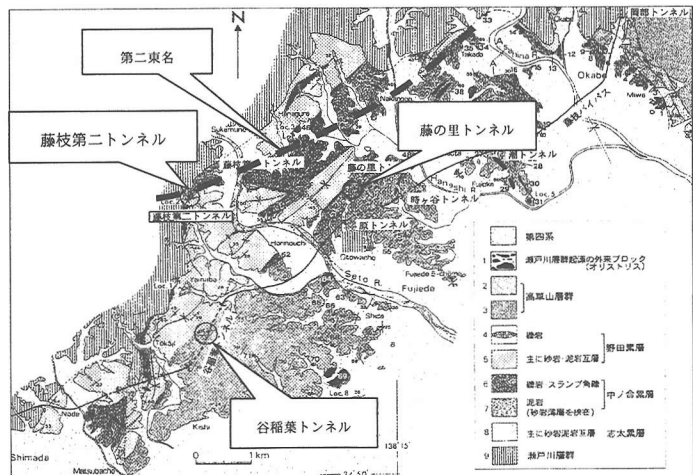


図-1 地質平面図

- 1) 日本道路公団 静岡建設局 静岡工事事務所 藤枝工事区 工事長
- 2) 日本道路公団 静岡建設局 静岡工事事務所 藤枝工事区 主任
- 3) 日本建設コンサルタント(株)東京支社 技術課長
- 4) 日本国土開発(株)・(株)森本組共同企業体 所長
- 5) 日本国土開発(株)・(株)森本組共同企業体 工務主任

積層が、その後の褶曲、侵食、風化等の影響を受けた泥岩主体の地山で構成される。切羽に現れた泥岩は完全に土砂化したもの、あるいは一見岩片状のものでも鏡肌を伴う微細な潜在亀裂に沿って容易に剥離、開口する特性を持っていた。

また、同様の泥岩類地山で施工された近傍のトンネル（2車線断面）では多数の変状事例（静岡県藤の里トンネル：地耐力不足により400mmの沈下 坑内変状等、国道1号線BP谷稲葉トンネル：大変位に伴う変状 縫い返し等）が報告されている。

本トンネルは変状トンネルと同様の脆弱泥岩地質で、しかも掘削断面積が2車線トンネルの約2.5倍で、偏平率が0.6の超大断面を施工することから、トンネルの安定確保には諸々の問題が生じることが予想された。

本文ではトンネルの安定性に関する事前の調査・解析結果と、施工と共に実施した計測結果に基づく解析から行った支保対策工（側壁導坑先進工法・中央導坑併進拡幅掘削工法・二重支保対策工）等について報告する。

2. 支保構造の事前検討

本トンネルの追加地質調査から施工までのフローを示すと図-2のとおりである。

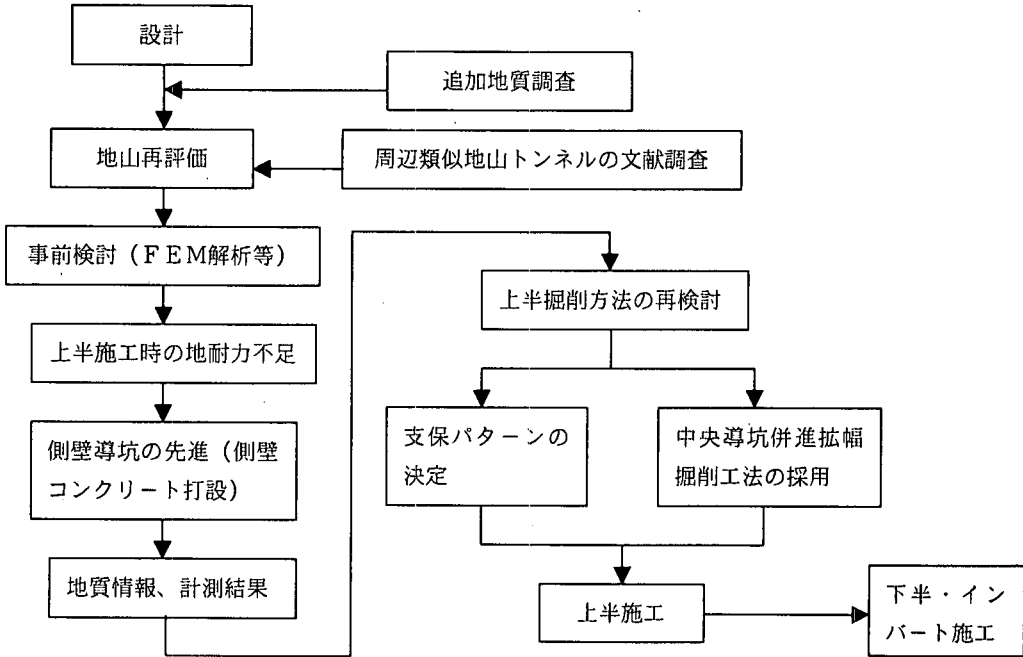


図-2 掘削方法検討フロー

2. 1 地質調査および事前検討

当初設計の掘削工法は上半中壁工法であった。しかしながら、先のトンネル変状事例、追加の地質調査の結果からトンネル施工においては切羽の自立性、地耐力の不足、支保の耐荷力不足等の問題が生じることが予想された。

図-3は地山の再評価により定めた地山特性を用いて、上半中壁工法について解析した結果である。解析の結果、上半中壁工法の場合上半後進坑掘削時に塑性領域が拡大する他、脚部地山の地耐力が不足し、トンネルの安定確保が

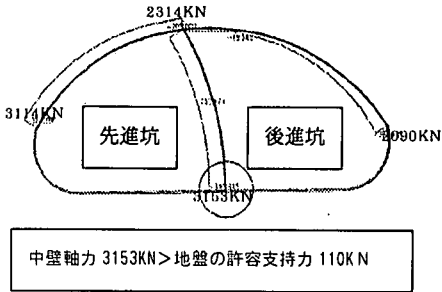


図-3 上半中壁工法のFEM解析結果

困難と判断された。側壁導坑先進工法においても地耐力の確保ができるものの塑性領域の拡大が予想されたが、支保耐荷力の補強および先行的な補強工によりトンネルの安定性が保持できると判断し、地耐力が確保される位置まで「側壁導坑先進工法」を基本工法として選定した。

2. 2 側壁導坑施工結果と上半支保構造の検討

側壁導坑施工時、先進する下り線右側側壁導坑で地山の再評価を目的に下記に示す試験・計測を実施した。

- 平板載荷試験
- 内空変位・天端沈下測定
- 地中変位測定
- 吹付コンクリート応力測定
- 鋼製支保工応力測定
- 地中沈下測定（坑外）

側壁導坑施工時には幾度も切羽崩壊が発生し、比較的剛性の高い支保で施工したにもかかわらず内空変位は最大で6.2mmを記録した。なお、側壁導坑断面は掘削幅、高さ共5m程度でインバート吹付による閉合を行った。（H-150，吹付コンクリート $t=15\text{cm}$ 、図-4参照）

側壁導坑での調査・計測の結果、当該トンネルの地山物性は事前調査結果での評価より更に悪く、地山等級は「E」と判定され、上半施工時、以下のような問題が生じることが推測された。

- 1) 上半切羽での不安定化（側壁導坑施工時での切羽崩壊現象発生により大断面での掘削は不可能と判断）
- 2) ゆるみ荷重に対する支保部材の耐力不足

このため、上記の問題に対して下記の対策工を選定した。

- 1) 中央導坑併進掘削工法+先行補強斜めボルト
- 2) 支保の耐荷力の増強

施工方法を要約すると、下記の通りである。

掘削工法：「中央導坑併進掘削工法」（中央導坑、上半切羽共に20mずつの交互併進）上半の掘削工法は加背を小分割し、かつ先行的に地山補強が可能

支保構成：吹付コンクリート $\sigma_{cf}=30\text{N/mm}^2$ $t=30\text{cm}$ 、鋼製支保工 高規格支保工（HH-200 @ 1.0m）図-4参照

対策工：先行補強斜めボルト（中空FRPボルト $L=4\sim6\text{m}$ セメント系注入材使用）

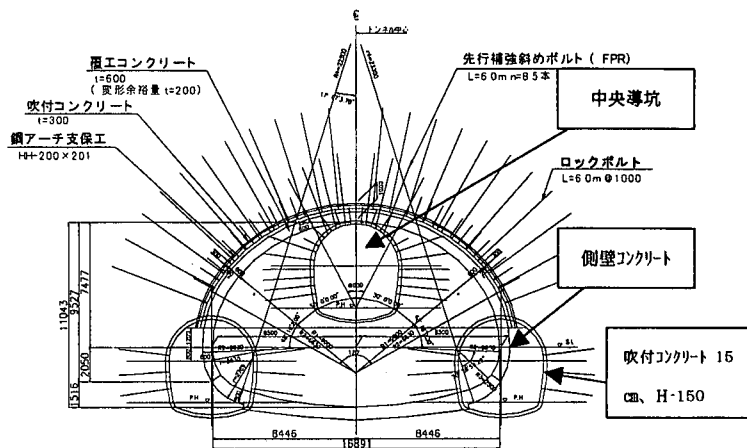


図-4 トンネル標準支保パターン図

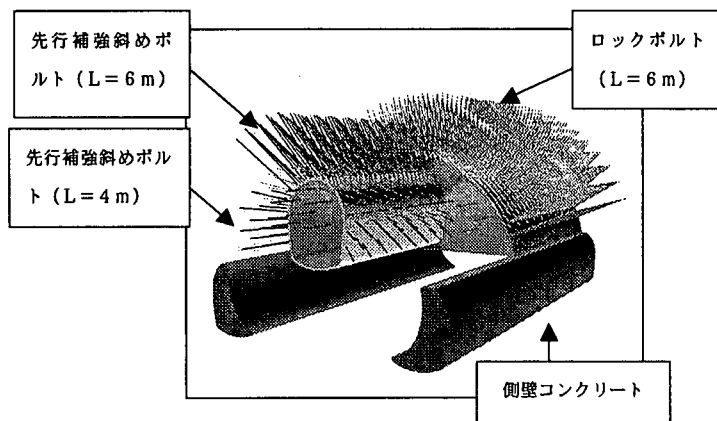


図-5 先行補強対策模式図

鏡ボルト（FRPボルト $L=4\text{ m}$ ）図－5 模式図参照

その他：変形余裕量 20 cm

なお、変形余裕量の 20 cm は側壁導坑施工時に得られた地山物性値にて骨組解析した結果（最大値 13 cm の変形）から 20 cm を見込んだ。

3. 支保対策工の検討と施工結果

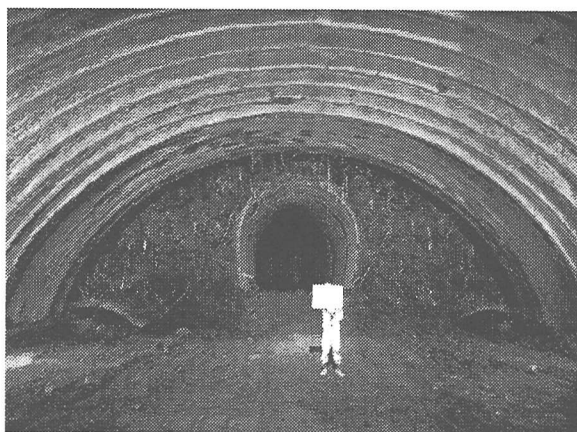
3. 1 上半掘削の施工結果

上半掘削時土被りの小さい坑口部では、ほぼ全土被り荷重が作用したものの、側壁コンクリート底盤部が支持効果を発揮し、トンネルの安定性が確保できた。

しかしながら、坑口から約 90 m （土被り約 36 m 図－8 ③断面）で実施した計測工Bにおいて、ゆるみが上方に拡大する他、鋼製支保工が降伏し（降伏応力度 440 N/mm^2 ）、吹

付コンクリートも高い応力状態にあることが判明した。各々の支保部材応力も収束傾向が認められず、トンネルの安定性に問題を生じた。発生応力の挙動としては軸力が卓越し、曲げモーメントの発生は小さかった。なおA計測の測定結果は天端沈下で最大 4 cm 程度にとどまり、側壁導坑の支持力効果が発揮されたと考える。

以上より作用外力（主に鉛直荷重）を推定した上で、支保対策の検討を行った。



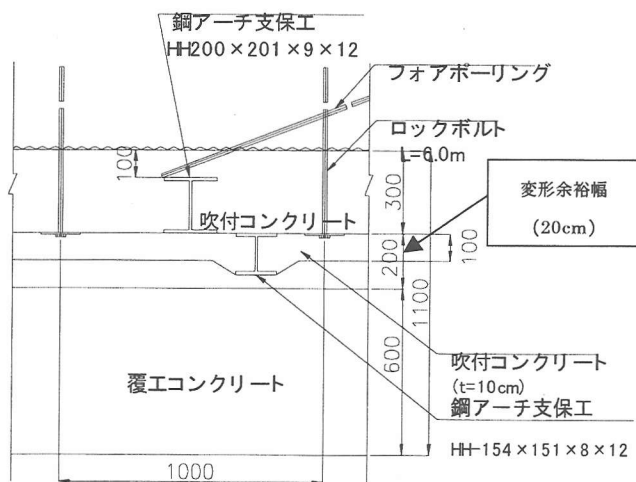
写真－1 切羽写真（上半盤にて撮影）

3. 2 二重支保工法の選定

対策の検討にあたっては、種々の対策工法を比較検討した結果、支保耐力、施工性、経済性、材料の市場性等を考慮して行った。

本ケースの場合、変形余裕幅が対策しろとして使用できる上、全土被り荷重に対しても安定性が確保されること、膨張性地山などで効果が確認されていること、等から「二重支保工法」を選定した。

一次支保工の内側に施工する二次支保工は高強度吹付コンクリート（ $t=10\text{ cm}$ ）、高規格鋼製支保工（HH-154@ 1.0 m ）で変形余裕幅内に設置し、一次支保工の鋼製支保工の応力状態により、施工の有無を判定した。（図－6 参照）



図－6 二重支保対策標準図

二次支保工の施工の判定は計測結果の経時変化の挙動に基づき、図－7の管理曲線を基に行った。この管理曲線は③断面（坑口より 90 m 付近）で既に降伏応力度に至った鋼製支保工の応力経緯を切羽との距離で関連づけたものである。図中の「管理レベルC」の曲線がその経緯に該当する。つまり「管理レベルC」を上回る応力速度が発生した場合は鋼製支保工が降伏に至るため早期に二重支保対策を施すこととした。

図-8はこの結果二重支保対策を行った区間を示したものである。概ね、下り線全延長の約1/3の区間に対して、二重支保対策を実施した。なお、図中の○印は対策の要否を判定するために実施した計測工Bの位置を示している。

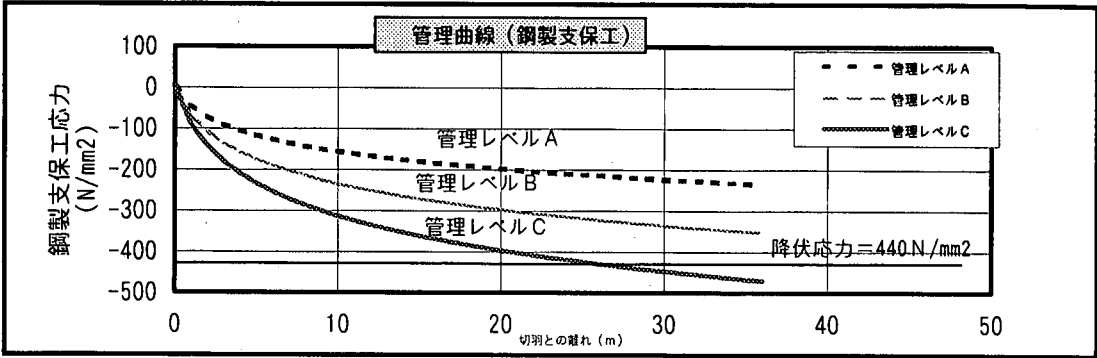


図-7 管理曲線（鋼製支保工）

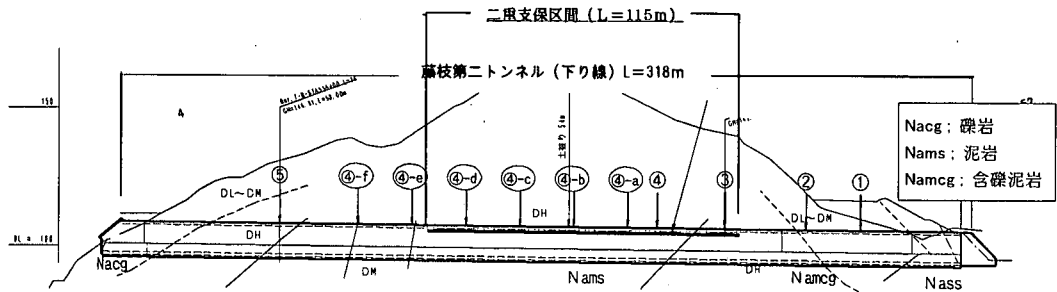


図-8 二重支保対策区間

3. 3 二重支保工法の施工結果

図-9に代表的な二重支保の鋼製支保工軸応力図を示す。

この断面（④-b）では一次支保の段階で③断面を上回る応力速度が発生したため、切羽距離5mで二次支保の施工を行った。その結果、二次支保の施工に伴い急激に応力速度が減少し安全側に移行した。

また一次支保、二次支保の挙動を分析すると双方の応力の変化状況は二次支保工施工後、ほぼ等しいことから二次支保は一次支保と一体となって挙動し、二重支保対策工が効果的であることが判明した。最終的な一次支保と二次支保の荷重分担は概ね80%と20%であった。

また本トンネルでのB計測結果（鋼製支保工、吹付コンクリート応力測定）からトンネルに作用した荷重（鉛直荷重）を軸力換算して算出した。その考察を以下に示す。

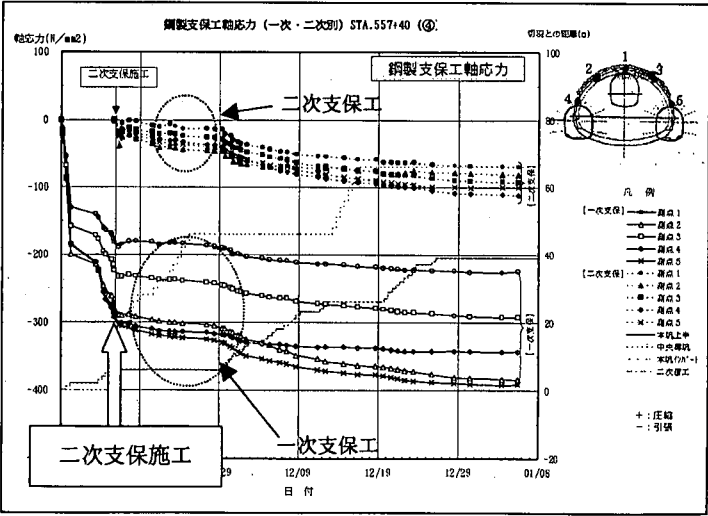


図-9 鋼製支保工軸応力図

1) 坑口部では全土被り以上の荷重が作用している。

2) 坑奥部（概ね土被り3.5m以上）ではグラウンドアーチの形成で鉛直荷重<全土被り荷重であるが、概ね全土被りの57～92%の荷重が作用し、テルツァーギ的な挙動を示した。

その他にも地表面沈下は最大土被り部分で約11cmに達し、トンネル掘削の影響を示した値と考える。

これらの結果から、二次覆工の設計は、本トンネルの土被りが小さく全線坑口部とも言える地形・地質状況であり、長期的には現行の一次覆工に作用している荷重の多くが作用することが懸念されたため、全土被り荷重が作用することを前提に骨組計算での検討を行った。また、トンネル施工時、曲げモーメントが小さく軸力が卓越する傾向にあったことから、曲げモーメントは参考程度に留め、軸力主体で設計した。

二次覆工コンクリートの主な仕様は以下の通りである。

□覆工コンクリート強度：30N/mm²

□覆工コンクリート厚さ：60cm

□補強鉄筋：D19複鉄筋構造

□その他：SFRC（0.5%のSF混入、設計上では曲げ靱性等は考慮していない）

4. おわりに

「二重支保工法」は対策工検討時、一次支保、二次支保が一体として挙動せず効果を発揮しないのではないかと懸念もあった。しかし計測による判定で二次支保が想定通り、二重支保としての効果を発揮し、トンネルの安定性が確保できたと考える。

「二重支保工法」が今回支保補強として期待通りの効果を発揮したのは以下の要因があったためと考える。

1) 側壁コンクリートを施工し、地耐力を事前に強化し、脚部での支保反力が十分に発揮できる条件であったこと。

2) 変形余裕幅20cmが二次支保設置スペースとして、利用できたこと。（当初の解析結果から変形するものと考えていたが、側壁導坑の支持効果、先行補強ボルトの地山改良効果、中央導坑自身の杭的な切羽抑止効果等により実質数cmの変形に抑えることができた。）

また、地山が悪いことから早期閉合することが望ましいと考えられたが、当該トンネルでの上半掘削面積は約100m²であり、安全性の問題から加背を小分割しなければならなかった。しかしながら各導坑ではインバートによる早期閉合を施し、かつ地山補強を行うことにより、変位抑制に努めた。また下半およびインバートの施工は上半掘削が完了し、ある程度安定した後に行っている。（下半およびインバートの施工は分割せず同時に行い、5.25m毎に施工した。）

当トンネルは施工開始（側壁導坑）から上半貫通まで約2年（平成11年9月～平成13年6月）を要している。しかしながら、当トンネルの地山は極めて脆弱であり、近傍でこれまでに施工された通常の2車線断面トンネルでの変状事例（度重なる変状と縫い返しを余儀なくされていること）を考えると、我々にとって未経験と言える脆弱地山での偏平超大断面トンネル施工を計測データ等の分析と施工へのフィードバックにより、技術的検討課題を克服し大きなトラブルもなく慎重かつ着実に掘進出来たことは大いなる喜びである。これもひとえにトンネル委員会・幹事会をはじめとする関係各位の方々のご指導、ご助言のお陰であり、深く感謝する次第であります。

参考文献

池谷、石田、山田、野村：第三紀泥岩トンネルにおける大変形とその抑止、トンネル工学研究論文・報告集第7巻、1997（藤の里トンネル）

林、西田、古賀、高崎；膨張性トンネルの変状調査、第12回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1979（谷稲葉トンネル）