

膨張性地山に施工されるトンネル二次覆工の補強に関する調査と設計

EXPLORATION AND SECONDARY LINING DESIGN FOR SWELLING GROUND

末永 充弘*・佐藤 愛光**・近久 博志***・筒井 雅行****・大和 敏郎*****

Mitsuhiro SUENAGA, Aimitsu SATO, Hiroshi CHIKAHISA, Masayuki TSUTSUI, Toshiro YAMATO

Secondary lining of tunnels is used to increase the safety factor of primary supports, and is not generally subjected to loading. However, it is regarded as supporting members in swelling ground, earth ground with an extremely low strength ratio. Nevertheless, it is difficult to estimate the loads that will act on secondary lining after it is put into use, and the design method for reinforcing secondary lining concrete is yet to be established, to ensure the long-term stability of tunnels.

The authors had an opportunity to design the secondary concrete lining as supporting members in the serpentinite ground of the Dai-ni Imaizumi Tunnel along the Kyushu Shinkansen. In this paper, the procedure of exploring, measuring and design employed to solve such a problem is reported. They also discuss the generated stress of the secondary lining and the displacement behavior of surrounding ground on the basis of the measurement.

Keywords : *swelling ground, secondary lining, measurement results, back analysis, limit state design method, steel fiber reinforced concrete*

1. はじめに

トンネルの二次覆工は、一般的には荷重は作用せず、一次支保工の安全率を向上させる部材であるが、膨張性地山、土砂地山や地山強度比が著しく小さい地山などでは、支保機能を有する部材として位置づけられる¹⁾。すなわち、地山条件によっては、一次支保工と二次覆工とで地圧に対抗して周辺地山の安定を図るという設計が行われる場合がある。

しかしながら、実際には、供用後の将来に亘って二次覆工に作用する荷重を特定することは難しく、トンネルの長期安定性を確保するための二次覆工コンクリートの補強に関する設計法が確立されていないのが現状である。

また、構造設計により二次覆工を複鉄筋コンクリート構造とする場合には、坑内での配筋作業の施工性、ひび割れの発生や剥落などの問題が生じている。

筆者らは、九州新幹線第2今泉トンネル^{2), 3), 4)}の蛇紋岩区間において、支保部材としての二次覆工コンクリートを設計する機会に接した。ここでは、上記の問題を解決する一手法として実施した調査、計測とその評価および設計について報告する。また、推定した設計荷重や断面算定法などの設計手法の検証のために実施している計測結果から、発生応力度と周辺岩盤の変位挙動について若干の考察を行う。

* 正会員 日本鉄道建設公団 設計技術室, ** 日本鉄道建設公団 九州新幹線建設局八代鉄道建設所

*** 正会員 工博 飛鳥建設(株)技術研究所, **** 正会員 飛鳥建設(株)技術研究所

***** 正会員 飛鳥建設(株)九州支店 新幹線第2今泉作業所

2. 地質概要

本トンネルの施工位置は、「黒瀬川構造帯」と呼ばれる地域で、この構造帯は図-1に示すように、数kmの幅を持って九州を東から西に横断している。この地域では、多数の構造線、地質構造を画す規模の大きい断層が平行して走り、その間に中生層堆積岩（頁岩、砂岩、チャート）、八代花崗岩類、八代片麻岩類、蛇紋岩などの多種多様の岩種が複雑に分布している。この中で蛇紋岩は、この構造帯中にレンズ状に分布している。

本トンネルの蛇紋岩は、塊状、礫状の蛇紋岩を主としており、比較的安定した地質性状を示しているが、一部区間では、粘土状、葉片状の蛇紋岩が主体を占め、大きな変形と顕著な変状が生じた。ここでは、蛇紋岩区間のうち、この変状区間について述べる。

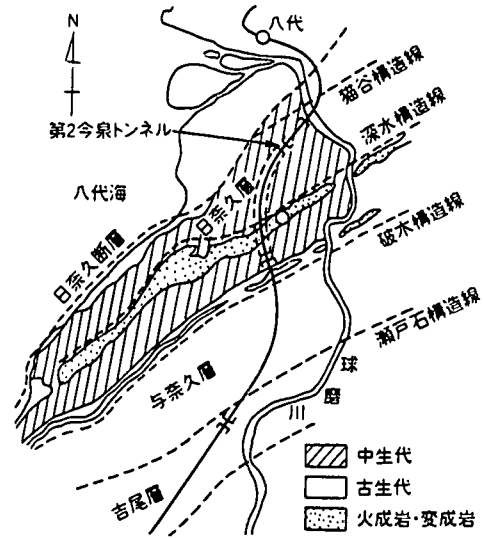


図-1 地層分布図

3. 蛇紋岩区間の施工経緯

第2今泉トンネルは、九州新幹線鹿児島ルート八代-新水俣間のうち八代寄りに位置する延長4,700mの新幹線複線型のトンネルである。このうち、9k715mから9k600mの区間では、葉片状、粘土状の極めて脆弱な蛇紋岩に遭遇し、増しボルト、増し吹付けや仮閉合等の対策工を余儀なくされた。図-2の内空変位の経時変化に示すように、変位速度は、インバート仮閉合により小さくなったものの、掘削後150日で4.7mm/月となっており、長期的な後荷現象が生じている。

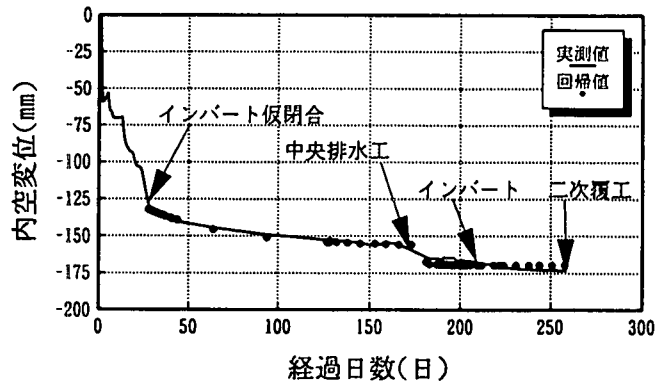


図-2 内空変位の経時変化と回復値

4. 追加調査と計測結果の評価

二次覆工コンクリートの設計に必要な地山物性値を得るために、調査ボーリング、PS検層、孔内水平載荷試験および針貫入試験の追加調査と、内空変位と天端沈下の計測結果を基にした逆解析法によってトンネル周辺地山の物性値やひずみ分布を調べた。

解析条件を表-1に示す。逆解析により同定する物性値は、地山の塑性やクリープ挙動を含めて変形係数として評価した等価弾性係数と地山の初期応力である。

表-1 解析条件

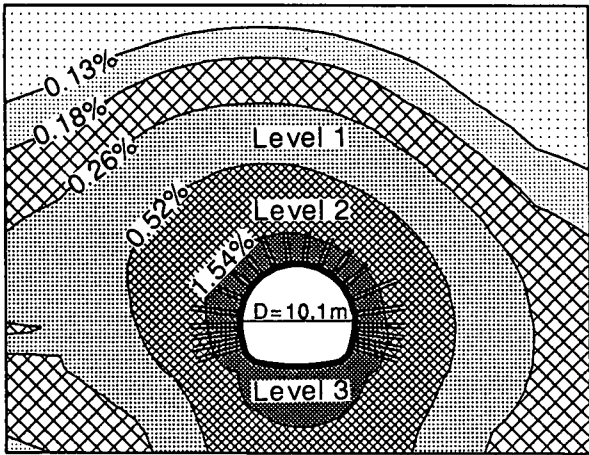
項	目	物 性 値
地 山	単位体積重量	2.3 tonf/m ³
	ポアソン比	0.3
	等価弾性係数	*計測結果より同定
	初期地圧係数	*計測結果より同定
吹付け コンクリート	等価弾性係数	34,000 kgf/cm ²
	吹付け厚	12.5 cm
ロックボルト	弾性係数	2,100,000 kgf/cm ²
	断面積	5.07 cm ²
二次覆工 コンクリート	弾性係数	235,000 kgf/cm ²
	覆工厚	30.0 cm

逆解析結果と調査・計測結果を表－２に比較して示す。また、解析結果として得られる地山の主せん断ひずみ分布図を図－３に示す。図中に示した注意レベルは、櫻井⁵⁾による地山の限界ひずみに対応している。

内空変位と天端沈下の計測結果やＰＳ検層で得られるいわゆる緩み深度等が逆解析の結果と良く一致していることが分かる。

表－２ 逆解析結果と調査・計測結果

	逆解析結果	調査・試験結果
変形係数	地山の等価弾性係数 $E=2,000\text{ kgf/cm}^2$	孔内水平載荷試験 深度 変形係数(kgf/cm ²) 1m 1,350, 1,150 4m 2,740, 950 7m 2,150, 1,710
地 圧	側圧係数：Kh=1.0 せん断係数：Kt=0.05	－ －
坑内変位	内空変位：165.6 mm 天端沈下： 67.0 mm	内空変位：166.4 mm 天端沈下： 66.9 mm
ひずみ分布	ひずみ(Ⅰ) 深度 0～0.524 %(Ⅰ) 10m～ ～1.541 %(Ⅱ) 3.5m～ ～4.535 %(Ⅲ) 0m～	PS検層の速度境界 深度3.0m～3.5m



図－３ 主せん断ひずみ分布図（逆解析）

5. SFRCによる二次覆工コンクリートの設計

本トンネルの粘土状蛇紋岩の変状区間における二次覆工の設計フローを図－４に示す。

設計法の詳細については文献6),7)に譲るが、基本的理念として限界状態設計法を採用し、部材試験から構造材料特性を評価しており、SFRCのもつ引張抵抗力および変形性能を評価できるものを用いている。

設計に必要な蛇紋岩の物性値は４．で示した追加調査によって調べるとともに、変形のモードや偏圧の度合いなど、一次支保の段階でのトンネル周辺地山の変形に関わる物性については、計測結果を基にした逆解析手法によって求めている。

一方、覆工に作用する荷重は、リング仮閉合後の変位の進行を図-2中の●に示すように指数関数、

$$c = a \{1 - \exp(-\beta t)\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $a = -35.5\text{mm}$, $\beta = 0.007$

c : 変位量 (mm)

t : リング閉合時からの経過日数

で近似し、 $t = \infty$ における変位量から、変位の増分を全掘削解放力に対する比率として表-3のように推定した。

表-3 各限界状態における設計荷重

限界状態	全掘削解放力に対する比率
使用限界状態	10 %
終局限界状態	15 %

表-4 断面力算定結果

発生位置	使用限界状態		終局限界状態	
	M (tonf・m)	N (tonf)	M (tonf・m)	N (tonf)
アーチ部	1.48	160.76	2.23	240.91
側壁部	11.02	88.23	16.54	131.92
隅角部	10.33	115.42	15.53	173.08

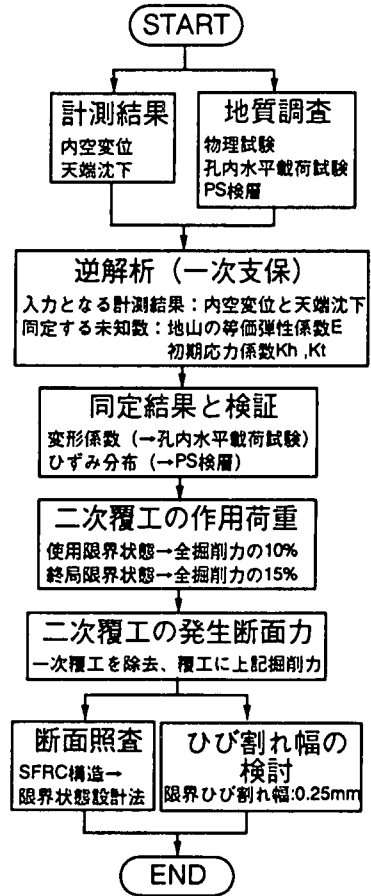


図-4 二次覆工の設計フロー図

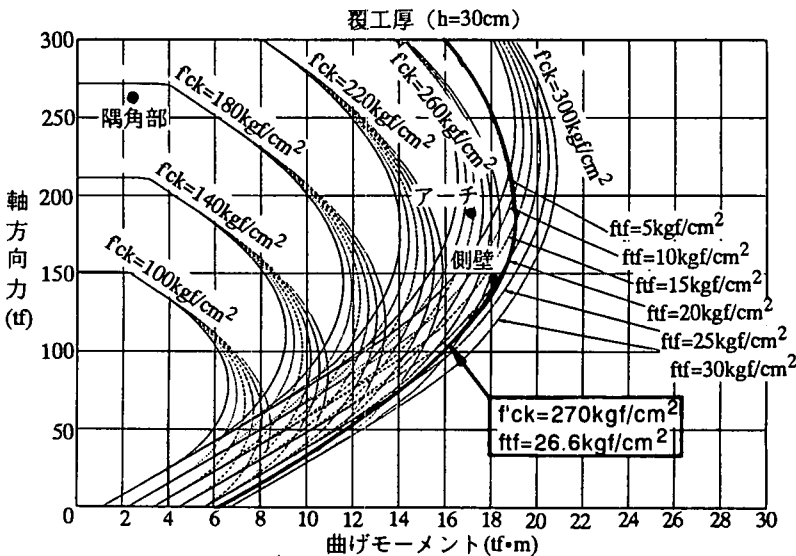


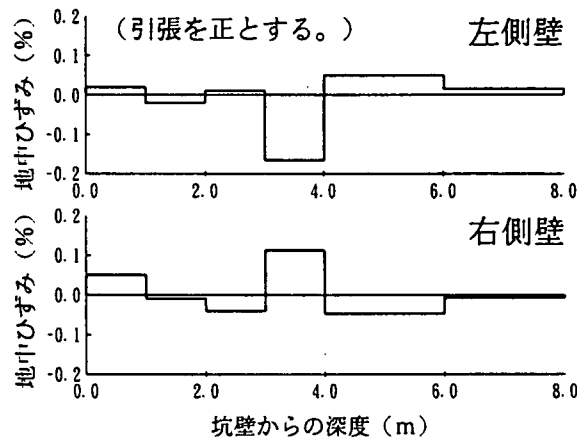
図-5 安全性の照査 (M-N曲線)

一次支保までの解析ステージの結果から一次支保を除去し、二次覆工（巻厚30cm）を取り入れて使用、終局の各限界状態に対応する掘削力を作用させて二次覆工に発生する断面力を算定した。断面力の算定結果を表－4に示す。また、図－5のM-N曲線上に断面耐力の照査結果を示す。この結果、二次覆工コンクリートの設計基準強度 $f'_{ck}=270\text{kgf/cm}^2$ 、SF混入率0.75%によることとした。

6. 二次覆工施工後の地中変位と発生応力

安全性の確認とともに、本設計法（特に、設計荷重と断面算定法）の検証のために実施している地山変位測定（地中変位、内空変位）と二次覆工コンクリート応力測定の1995年8月末までの計測結果について述べる。

計測結果のうち、側壁に設置した地中変位計から得られる区間ひずみの分布図を図－6に、二次覆工の縁応力を表－5に示す。



図－6 二次覆工後の地中ひずみ分布図 (9k693m)

表－5 二次覆工の縁応力度と発生断面力

(9k693m)				
断面位置	縁応力 kgf/cm^2		軸 力 tonf	曲げモーメント tonf・m
	内 側	外 側		
天 端	12.9	4.4	25.9	-0.63
側壁（左）	14.6	3.2	26.8	-0.85
側壁（右）	6.8	12.2	28.5	0.41
インバート	3.6	21.4	37.5	1.34

(9k648m)				
断面位置	縁応力 kgf/cm^2		軸 力 tonf	曲げモーメント tonf・m
	内 側	外 側		
天 端	11.3	-2.9	12.6	-1.06
側壁（左）	3.2	-6.3	4.6	-1.71
側壁（右）	16.5	7.9	36.6	-0.65

(圧縮を正とする。)

二次覆工後の現状における計測結果をまとめると以下ようになる。

- ①二次覆工後の地中変位は、最大で1.3mmと掘削後の変位に比べて微小であるが、坑壁から3～4mの区間で最大区間ひずみを示しており、それより坑壁寄りの地山は圧縮されている。
- ②二次覆工後の周辺地山は、逆解析の結果で得られた地山の限界ひずみで注意レベルⅡとⅢの境界付近で若干の挙動があるが、二次覆工施工後2週間程度で収束している。
- ③二次覆工に発生する応力度は、設計引張強度に対して30%程度である。
- ④一次支保の段階で長期的な微小変形が続いていた状態から、二次覆工により支保の剛性が高まり、この変形を抑え込んだことにより、地山の応力状態が、不安定ながらも平衡状態に至っているものと考えられる。

7. おわりに

本報告では、膨張性地山におけるトンネルの長期安定性を確保するために実施した、二次覆工コンクリートの補強に関する調査と設計の一手法について述べた。本工事では、SFRCによる二次覆工コンクリートの施工から1年経過した現在、ひび割れなど生じることもなく順調に施工を進めている。

ここでの主眼点は、膨張性地山において、施工時のみならず維持管理を含めてトンネルの機能を確保するために、二次覆工コンクリートをSFRC構造とするとともにその引張抵抗力および変形性能を十分に評価できる設計法を採用してトンネルの高品質化を図ったことと、その設計条件となる地山物性値と荷重（二次荷重）とを一次支保の段階での調査と計測結果から同定したことである。

今後は、地山変位測定と二次覆工コンクリート応力測定を継続し、ここで述べた、調査・計測結果をフィードバックさせた設計手法を検証するとともに、SFRCによる施工実績を収集し、安全かつ合理的なトンネル二次覆工の設計手法の確立に努めて行きたい。

8. 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）・同解説
- 2) 江藤幸記・村山正己・橋詰順一・近久博志：中央構造線をNATMで掘る，トンネルと地下，24-10，pp.785-795，1993.10
- 3) 大森紀義・大和敏郎・近久博志・筒井雅行：切羽観察記録を用いたトンネルの切羽と天端の安定のための管理手法，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-112，pp.278-279，1993.9
- 4) 江藤幸記・村山正己・橋詰順一・大和敏郎：蛇紋岩地山をNATMで掘る，トンネルと地下，25-6，pp.459-468，1994.6
- 5) Sakurai, S. : Displacement Measurements Associated with the Design of Underground Openings, Proc. Int. Symp. Field Measurements in Geomech., Zurich, Vol.2, pp.1163-1178, 1983
- 6) 日本鉄道建設公団：併進工法設計施工指針（案）都市トンネル編，1992.4
- 7) 鋼材倶楽部SFRC構造設計施工研究会編：鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル（トンネル編），1995.7