

トンネル支保のマルチ化に関する研究

APPLICATIONS OF A NEW SYSTEM FOR OBTAINING THE MOST SUITABLE TUNNEL SUPPORT PATTERN

吉塚守**・三谷浩二*・中田雅博*

Mamoru YOSHIZUKA Koji MITANI and Masahiro NAKATA,

More than fifteen years have passed since JH employed the New Austrian Tunneling Method (NATM) as a standard method of tunneling, in which shotcrete and rock bolts are used for supports. The NATM is an approach or philosophy which features the continual monitoring of the rock movement and the revision of supports to obtain the most stable and economical lining. However, there is no concrete method for revising support reflecting the results of monitoring. Thus, JH creates a new system which consists of new rock mass classifications and new standard support patterns in order to select the most suitable support pattern at the tunnel construction sites, by analyzing data collected from tunnel construction sites and experimental works. This new system has been introduced into nationwide tunnel construction sites of JH on a trial basis. We describe herein the results of the introduction of the new system .

Keywords: tunnel, support, NATM, standard support patterns, new rock mass classifications, multiplicity of tunnel support

1. はじめに

吹付けコンクリートとロックボルトを主な支保部材とするNATMが、山岳トンネルの標準的な工法としてJHにおいて要領化され15年以上が経過している。本工法の特徴は、施工段階における切羽の観察や、掘削による地山の挙動及び支保部材の計測等を用いることにより、実際の地山状況を確認し、支保量を変更することである。

しかしながら、設計の変更手法については定量的に明らかにされておらず、JHの現場においても、必ずしも観察・計測された結果が、設計の見直しに適切にフィードバックされているとは言えず、経験的、定性的な判断の基に、設計要領に示されている標準支保パターンのみを採用している場合が多く観られ、合理的・経済的な施工の観点からは、NATMの基本的考え方が十分に活かされているとは言えない。

そこで、試験研究所に蓄積されたデータから岩種別変位量の分析、支保を削減した現地での試験施工とそれらの観察・計測結果の分析から、地山状況に適した支保構造、支保部材削減の考え方・手法について整理・検討を行って、「新標準支保パターン」ならびに「新切羽評価点法」を設定し、平成8年11月より、全国の2車線トンネルを対象として試行導入を図り、実施工による検証を行っている。本報文は、平成9年6月末までの現場における計測データと支保パターンの関係を整理し、計測結果から新標準支保パターンの試行導入による状況を示すことで、今後のNATMにおける合理的・経済的な施工の一助とするものである。

* 正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室

** 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室

2. 試行導入の背景

設計段階の支保パターンの設定は、一般的に事前調査の精度の限界から、地山分類表による地山等級を求め、それに対応した（図1に階段状に示す）標準支保パターン¹⁾に基づいて決定される。これに対し、地山の性状が複雑・連続的に変化する実施工段階で、標準支保パターンのみの適用は、必然的に地山状況に応じて必要な支保量に対し過大となる範囲が生じる結果となり、合理的ではない。

したがって、いわゆるNATMの基本的考え方である「切羽の観察や計測を十分に活用し、地山の状況の変化にできる限り対応し、設計を修正することが必要であり、吹付けコンクリートの厚さ、ロックボルトの本数、長さ、鋼アーチ支保工を増減、1掘進長を延伸する等支保を細分化することが必要である。」といった設計の見直しが重要となる。

では、どの様に地山を評価し設計の見直しにフィードバックすべきかが課題となるが、ここで今回試行導入するに至った、「新標準支保パターン」と「新切羽評価点法」の設定経緯について概略の紹介をしておく。

2. 1 新標準支保パターンの設定経緯

新標準支保パターンは、NATMの標準支保パターンが設定されて以来、それをあまりにも画一的に適用してきたことを反省し、個々のトンネルの地質状況を良く観察し、それに適応したより合理的、経済的支保パターンを選択しようという、いわゆるトンネル支保のマルチ化の第一歩として設定されたものである。

図2にNATMにより施工され、観察・計測データが平成6年度までにJH試験研究所に蓄積（以下NATMデータベースという。）された全計測データを対象とした、ひずみと地山のみかけの弾性係数（剛性）について、支保の変状²⁾の有無で整理したものを示す。

桜井³⁾が提案している管理基準値を図上に表示すると、不安定領域と安定領域との境界線で支保部材の変状の有無が比較的明瞭に区別できることがわかる。つまり、大部分のトンネルでは変位量が小さく、支保工の変状もほとんどない。

また支保部材に変状がなく、地山の剛性が高く、ひずみの小さい安定領域に位置するデータが非常に多いことがわかる。

このような計測データの分析結果から、支保量を削減した施工が可能であると考え、全国の21箇所のトンネルにおいて現行の標準支保パターンから支保を削減した試験施工を実施した。

試験施工は、さまざまな岩種において当初の設計で地質・支保パターンが同一な区間60mを、現行の標準支保パターンによる区間30mと支保を削減した30m区間に分割して実施し、支保削減の影響を調査した。

これら試験施工の結果を受け、新たな標準支保パターン（同じ地山等級でも、変位が小さい場合は標準a、変位の生じる地山は標準bを採用できる区分とした）と支保の増減方向の具体を示した新標準支保パターン（表1）が設定された。

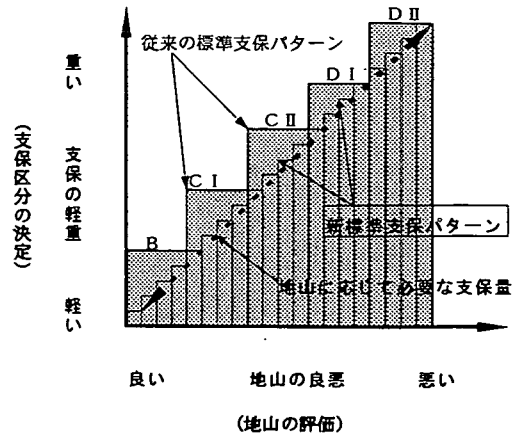


図1 トンネル支保マルチ化の概念図

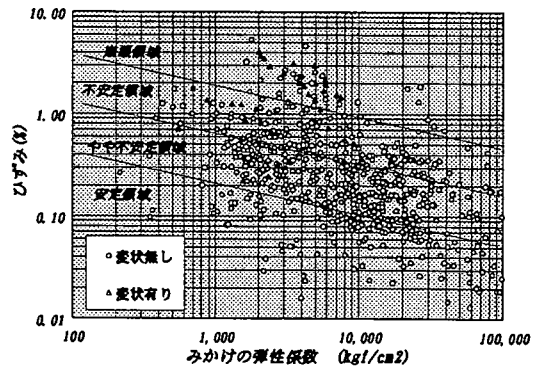


図2 地山の剛性とひずみ（変位）の関係

2. 2 新切羽評価点法の設定経緯

JHにおける、切羽観察自体は、これまでも切羽日報の作成時あるいは岩判定時の地山状況の把握の一環として実施されてはきたが、全ての岩質において一律に評価されてきた、そこで、NA TMデータベースの、支保パターンと内空変位量を分析し岩種毎の地山特性を把握することとし、

- ①内空変位量を支保パターン・岩種毎に整理して、変位の大小により、新しい岩種グループを決定。

(表2に整理された従来の岩種区分と新しい岩種グループを示す。)

- ②決定された新しい岩種グループ毎に観察項目と支保パターンの関係を、関連性分析により同種の観察項目が含まれないように絞り込み

- ③さらに、支保パターンを目的変数・各観察項目の評価ランクを説明変数とした、多変量解析(数量化Ⅱ類の手法を用いた)を実施し、

- ④観察項目毎の重みを決定する。(表3に絞り込んだ観察項目と重みを示す。)

などの分析を実施して、「新切羽評価点法」を作成した。

設定した「新標準支保パターン」および「新切羽評価法」を、全国に現地検証のための試行導入を行った。ただし、切羽の評価については当面現行の切羽評価法によることとし、新切羽評価点法との相違や、その適用性を確認するために、新切羽評価点法による方法を併記するスタイルで試行している。

以下に支保パターン別(新標準支保パターンに基づく)の新標準パターンの変位の傾向や、切羽観察による地山の評価内容と変位量との関係について示す。

表2 従来の岩種区分(a, b, c, d, e)と新しい岩種グループの関係

	硬質岩	中硬質岩	軟質岩
塊状岩盤	岩種グループ1 流れい岩(a) 花崗岩(a) 花崗閃緑岩(a) 石英斑岩(a) 花崗斑岩(a) ホルンフェルス(a) 角閃石(b) 砂岩、礫岩(中生代層)(a) 石灰岩、チャート(a) 片麻岩(a)	岩種グループ2 安山岩(c) 玄武岩(c) 石英安山岩(c) 流紋岩(c) ひん岩(a) 砂岩、礫岩(第三紀層)(b)	凝灰岩(b) 凝灰岩(d) 凝灰角閃岩(d)
		岩種グループ3 粘板岩(b) 頁岩(中生代層)(b)	岩種グループ4 千枚岩(b) 黒色片岩(a) 緑色片岩(a) 泥岩、頁岩(第三紀層)(d)
層状岩盤			

表3 新切羽評価点法の観察項目と重み

岩種グループ	重み					代表岩石名
	P _a	P _b	P _c	P _d	P _e	
1. 硬質岩・塊状	圧縮強度	風化実質	割目開度	割目状態	土盛り高	中古生層砂岩 花崗岩
2. 中硬質岩・軟質岩・塊状	2.5	0.5	0.5	1.0	1.0	凝灰岩 流紋岩
3. 中硬質岩・層状	2.5	1.0	0.5	0.5	1.0	粘板岩
4. 軟質岩・層状	1.5	2.0	1.0	0.5	1.0	黒色片岩 泥岩、頁岩

湧水に関する調査点

湧水状態による調査	F.湧水量	なしにじみ程度	湧水程度	集中湧水	全面湧水
評価点	水による劣化無	0	0	-5	-10
	水による劣化有り	0	-5	-15	-20

新切羽評価点の算定式

$$\text{新切羽評価点} = 100 \times \left[\frac{P_a \times (A-1) \times 100/5}{P_a \times (A-1) \times 100/5 + P_b \times (B-1) \times 100/3 + P_c \times (C-1) \times 100/4 + P_d \times (D-1) \times 100/4 + P_e \times (E-1) \times 100/6} \right] \div \{P_a \times P_b \times P_c \times P_d \times P_e\}$$

3. 試行導入延長の整理

3. 1 岩種グループ別延長

新標準支保パターンに基づき施工され、平成9年6月末までに収集されたデータを用いている。新切羽評価点法の岩種グループ別(表2)の施工延長には、岩種グループ2(中硬質岩、軟質岩・塊状)での試行実績が最も多く、施工延長約5,490mで全体の44.2%を占め、ついで岩種グループ1(硬質岩・塊状)延長約2,960m、岩種グループ3(中硬質岩・層状)延長約2,070mの順序となっている。(表4参照)

3. 2 地山等級毎の支保パターン別延長

今回集約したデータを、支保パターン別の施工延長について整理したものを図4(パターン名の+、-は支保の増減を示し、rはロックボルト、sは吹付けコンクリートである。)に示す。

表4 岩種グループ別施工延長

岩種グループ	代表岩石名	施工延長 (観断面回数)	割合 (%)
1. 硬質岩・塊状	中古生層砂岩 花崗岩	約2,960 □ (648 断面)	23.9
2. 中硬質岩、軟質岩・塊状	凝灰岩 流紋岩	約5,490 □ (1,615 断面)	44.2
3. 中硬質岩・層状	粘板岩 中古生層 頁岩	約2,070 □ (443 断面)	16.7
4. 軟質岩・層状	黒色片岩 泥岩・頁岩	約1,890 □ (542 断面)	15.2
合 計		約12,410 □ (3,248 断面)	100

4. 試行導入データの整理

4. 1 新切羽評価点法による評価データの概要

新切羽評価点法により観察し評価された、各観察項目(表3に示す5項目)別の評価データを土被り高を除く4項目について、各新標準支保パターン別に整理して、各支保パターンの平均的な地山状態と変更点での地山状況をまとめたものを表5に示す。

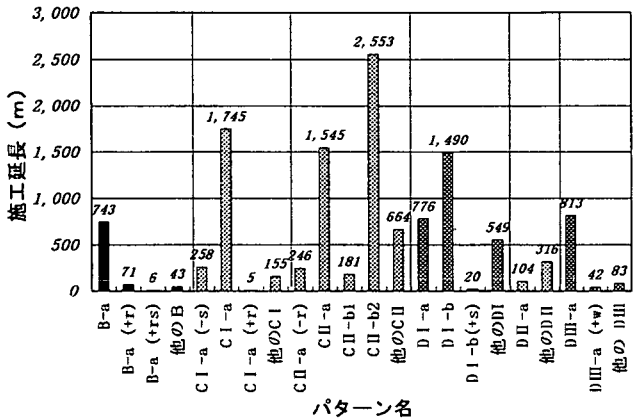


図4 支保パターン別施工延長

4. 2 計測データの概要

今回集約したデータの内、変位量に関するデータ数は、全体で560断面におよんだが、変位が収束した断面は270断面程度(D III区間を除く)であったため、変位量の整理は、切羽通過後2D(Dはトンネル直径)時の値で行うこととした。

表5 各支保パターンの平均的な地山状態と変更点での地山状況

	B-aパターン	C I-aパターン	C II-aパターン	C II-bパターン	D I-aパターン	D I-bパターン
支保の増						
圧縮強度	400kgf/cm ² 程度。	——	——	200kgf/cm ² 程度。	——	50kgf/cm ² 程度。
風化変質	割れ目沿い以外にも風化変質。	——	岩芯まで及んでくる場合がある。	岩芯まで風化変質。	——	土砂状になる。
割れ目の間隔	30cm程度。	15cm程度。	——	10cm程度。	——	5cm以下。
割れ目の状態	多くが開口し、一部に鏡肌がある。	多くが開口し、一部に鏡肌がある。	部分的に粘土を挟む。	狭い粘土が多く見受けられる。	——	狭い粘土が厚くなる。
平均的な地山状態						
圧縮強度	700kgf/cm ² 程度。	400kgf/cm ² 程度。	300kgf/cm ² 程度。	300kgf/cm ² 程度。	100kgf/cm ² 程度。	100kgf/cm ² 程度。
風化変質	割れ目沿いの風化変質。	割れ目沿いの風化変質。岩芯までは及ばない。	割れ目沿いの風化変質。岩芯までは及ばない。	割れ目沿いの風化変質。岩芯まではあまり及ばない。	岩芯まで風化変質。	岩芯まで風化変質。
割れ目の間隔	50cm程度。	40cm程度。	20cm以上。	20cm以下。	10cm程度。	10cm程度。
割れ目の状態(w:割れ目の幅)	w<1で一部が開口するが、概ね密着。	w<1で一部が開口。平滑であるが、鏡肌はない。	w<1で多くが開口。一部に鏡肌。粘土はほとんど挟まない。	w<1で多くが開口。部分的に鏡肌あるいは粘土を挟む。	1≦w<5で、粘土を挟む場合がある。よく磨かれた鏡肌。	1≦w<5で、粘土を挟む場合がある。よく磨かれた鏡肌。
支保の減						
圧縮強度	——	500kgf/cm ² を超える。	400kgf/cm ² を超える。	400kgf/cm ² 程度。	250kgf/cm ² 程度。	200kgf/cm ² 程度。
風化変質	——	——	——	——	岩芯までの風化が少なくなる。	岩芯までの風化が無くなる。
割れ目の間隔	——	——	40cm程度。	——	20cm以上。	——
割れ目の状態	——	——	一部が開口するが、鏡肌が無い。	開口の率が少なくなる。粘土を挟まない。	狭い粘土が無くなる。	——

4. 3 支保パターン別の変位量の比較

今回の試行期間内で、従来の標準支保パターンに該当するものと、それに対応する新標準支保パターン（従来に比べ支保を削減して設定された）で施工されたものに区分して、変位量を比較するために、2 D時の内空変位量と天端沈下量の関係を比較した。

(1) 地山等級B

地山等級Bの区間での対象データは、5トンネル24断面で、この内、従来のBパターンであるB-a(+r)で施工された区間の計測データが2断面、今回設定されたB-aで施工された区間のデータが22断面有り、このデータを各支保パターン別に区分してプロットしたものを図5に示す。

これによると、B-a(+r)での計測事例が少なく断定的なことは言えないが、B-aで施工した場合については、やや天端沈下量が大きくなる傾向がみられる。

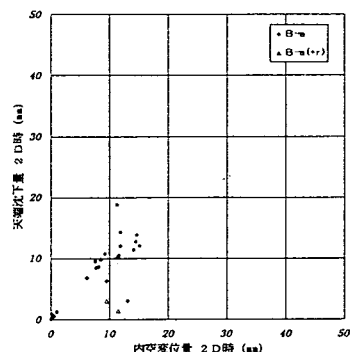


図5 支保パターン別変位量(地山等級B)

(2) 地山等級C I

地山等級C Iの区間での対象データは、11トンネル、51断面で、この内従来の標準支保パターンに比べ下半ロックボルトを削減したC I-aで施工された区間のデータが44断面、さらに吹付けコンクリートを薄くしたC I-a(-s)（吹付けコンクリート厚さ10cmを7.5cmあるいは5.0cmに低減）で施工された区間のデータが7断面有り、このデータを各支保パターン別に区分してプロットしたものを図6に示す。

これによると2 D時の内空変位量10mm程度以下の範囲で吹付けコンクリートを削減した支保パターンにより施工されたことが分かる。

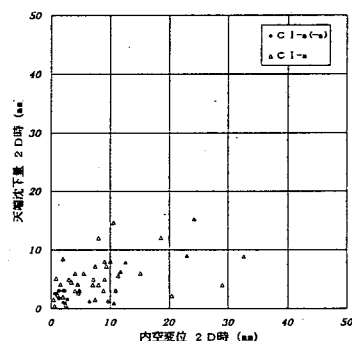


図6 支保パターン別変位量(地山等級C I)

(3) 地山等級C II

地山等級C IIの区間での対象データは、地山等級別で整理した場合最も数多く、20トンネル、154断面で、このうち、従来のC IIパターンであるC II-b2（鋼アーチ支保工を使用）で施工された区間のデータが91断面、今回設定されたC II-a（鋼アーチ支保工を削減）で施工された区間のデータが51断面有り、これを抽出し、各支保パターン別に区分してプロットしたものを図7に示す。

地山等級C IIで支保を削減（鋼アーチ支保工の削減）して施工した場合の変位量と、従来のC IIパターンで施工した場合とに差異が生じていない。

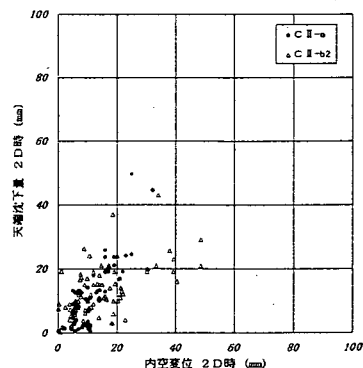


図7 支保パターン別変位量(地山等級C II)

(4) 地山等級D I

地山等級D Iの区間での対象データは、24トンネル、117断面で、このうち、従来のD IパターンであるD I-bで施工された区間のデータが73断面、今回設定されたD I-aで施工された区間のデータが40断面有り、これを各支保パターン別に区分してプロットしたものを図8に示す。

これによると変位量に明確な差はみられなく、地山等級D Iで支保を削減（ロックボルトの長さを短尺化）して施工した場合の変位量と、従来のD Iパターンで施工した場合とを比較すると、差異が生じていない。

(5) 地山等級DⅡ

地山等級DⅡの区間での対象データは、4トンネル、8断面分と少なく、今回対象になったトンネルにおいては変形余裕を見込むとしていたにも拘わらず小さなものとなっている。

(図9参照)

地山等級DⅡにおける試行実績は全体でも420mと短く、今後のデータの集約が必要である。

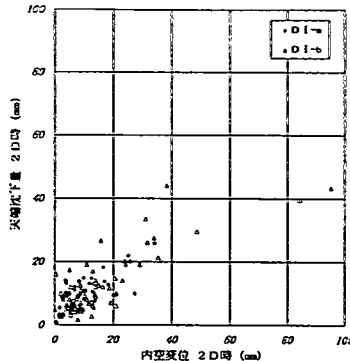


図8 支保パターン別変位量(地山等級DⅠ)

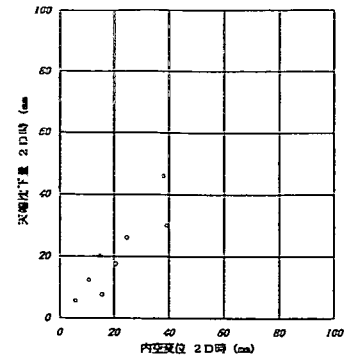


図9 地山等級DⅡにおける変位量

5. まとめ

今回、全国の2車線トンネルを対象として試行導入された、「新標準支保パターン」の平成9年6月末までのデータを整理した結果、以下の事項が確認できた。

- ①計測による変位量は、従来の標準支保パターンで施工された場合の変位量と、従来よりも支保量を若干軽めに移行した新標準支保パターンで施工した場合を比較すると、支保を軽くした場合でも施工が可能である、その変位量を比較した結果、大きな差異は発生していないことが確認された。
- ②地山等級DⅠで変位量が小さい地山でのロックボルトの短尺化による影響はほとんどない。

6. おわりに

本文では、従来よりも支保量を若干軽めに移行した「新標準支保パターン」による実施工での計測変位量に着目し、支保削減の影響がほとんどないことを確認し、「新標準支保パターン」が合理的・経済的なトンネル施工の一役となり、トンネル支保のマルチ化がより推進されることを期待して述べてきたが、今後さらに、

・支保の機能・効果を評価する手法についての検討

を実施して、より地山に応じた支保パターンの採用に当たっての指標の確立を目指した研究を進め、今回の「新標準支保パターン」が単なる標準パターンの変更ではなく、NATMの原点であるトンネル支保のマルチ化の再出発点としての役割を十分に発揮されんことを祈念して本文の結びとする。

(参考文献)

- 1) 日本道路公団. 設計要領第三集“トンネル”, p. 33-36, p. 79-87, 1985. 10
- 2) 清水, 有本, 古川, 中川, 佐藤, 中田. 山岳トンネルにおける変位計測結果と支保工の変状. 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第3部B. p. 1136-1137(1994-9)
- 3) 桜井. NATMにおける現場計測と管理基準値. 土と基礎, Vol. 34-2(1987-2)