

内空変位による支保パターン選定の試み

An Attempt to Select a Suitable Support System Based on Convergence

大里 祥生¹⁾・里 優²⁾・細川 裕³⁾・及川 隆⁴⁾

Yoshio OSATO, Masaru SATO, Hiroshi HOSOKAWA and Takashi OIKAWA

The cost of NATM can be decreased by the selection of suitable support system depends on geological condition. In this paper, the way how we can select a suitable support system is proposed based on convergence measurement, which is very sensitive to the behaviour of rock mass. The authors find out the relationship between allowable limit of convergence derived from critical strain and allowable limit of support stress derived from FEM analysis. Using this relationship we can choose ideal support system. The validity of this method is confirmed at Nou tunnel.

Key words: NATM, tunnel, allowable limit of convergence, support system.

1. はじめに

NATMにおいては情報化施工が必要とされ、大部分のトンネル現場において、日常施工管理のために内空変位測定を主とするA計測が実施され、地山条件などに応じて地中変位測定などのいわゆるB計測が実施されている。NATMトンネルでは、これらの計測結果に基づき地山に最適な支保工を施工することでトンネルの安定性を確保し、同時にコストダウンを目指している。このためには現場計測結果から地山の状況をできる限り迅速に判定し、施工へ反映させる技術が必要となる。

トンネルを掘削し支保工を建て込んだ後、支保工に変状が生じれば支保工を重くする必要があることは明らかであるが、変状がない場合には、現在の支保工の妥当性を計測値をもとに客観的に判定する必要がある。その判定は、計測値と岩盤状況の観察から経験的に行われている場合が多いが、情報化施工の観点からは、何らかの客観的手法により現在のトンネルの状態を評価し、その結果を基準に支保パターン変更の必要性を検討していくことが望ましいと考える。

ここでは、現場計測から得たトンネル周辺のひずみと限界ひずみの比較により、トンネル安定性を評価した桜井¹⁾や、初期変位速度から最終変位量を推定し、地山強度比と支保工荷重および最終変形量との関係を明らかにした谷本ら^{2), 3)}の手法を参考に、内空変位による支保パターンの選定を試みた。本手法の最大の特徴は、計測が容易な内空変位に基づいて最適な支保パターンの選定が可能なノモグラフを作成したことにより、トンネル経験の少ない技術者でも、毎日のA計測結果から客観的に支保

-
- | | |
|-----------|-------------------------|
| 1) 正会員 | 大成建設(株)技術研究所地盤研究部 |
| 2) 正会員 工博 | 地層科学研究所(株) |
| 3) | 日本道路公団東京第一建設局 |
| 4) | 大成・森本共同企業体 能生トンネル西工事作業所 |

工の妥当性を検討可能としたことである。

ここでは、内空変位による支保パターンを選定手法についてと、北陸自動車道・能生トンネル西工事に於いてこの手法を適用し、その妥当性を検討した結果について報告する。

2. 北陸自動車道・能生トンネル西工事の概要

本トンネルは新潟県西頸城郡能生町に位置し、フォッサマグナの東端部にあたる。地形は標高 160m 前後の丘陵地形を呈し、地質は新第三紀の能生谷層の泥岩を主体としている（図-1）。トンネル延長は 1,530m(全長約 3,000m)であり、既に供用開始されている能生トンネル一期線や避難坑の掘削時には水平押し出しが顕著で、膨張性の変形が生じたことが記録されている。二期線の本トンネルは、供用線に隣接（トンネル中心間距離 43m）しての避難坑拡幅工事であり、ベンチ長 3m 程の補助ベンチ付全断面掘削工法で施工している。

能生トンネルの避難坑では、路線の 10～50m 毎に岩石試験結果と計測データの記録が残されていた。そこで二期線掘削時には、過去のデータから地質を予測し、施工管理に有効活用した。この結果、計測自体のコストパフォーマンスを向上させることができた。

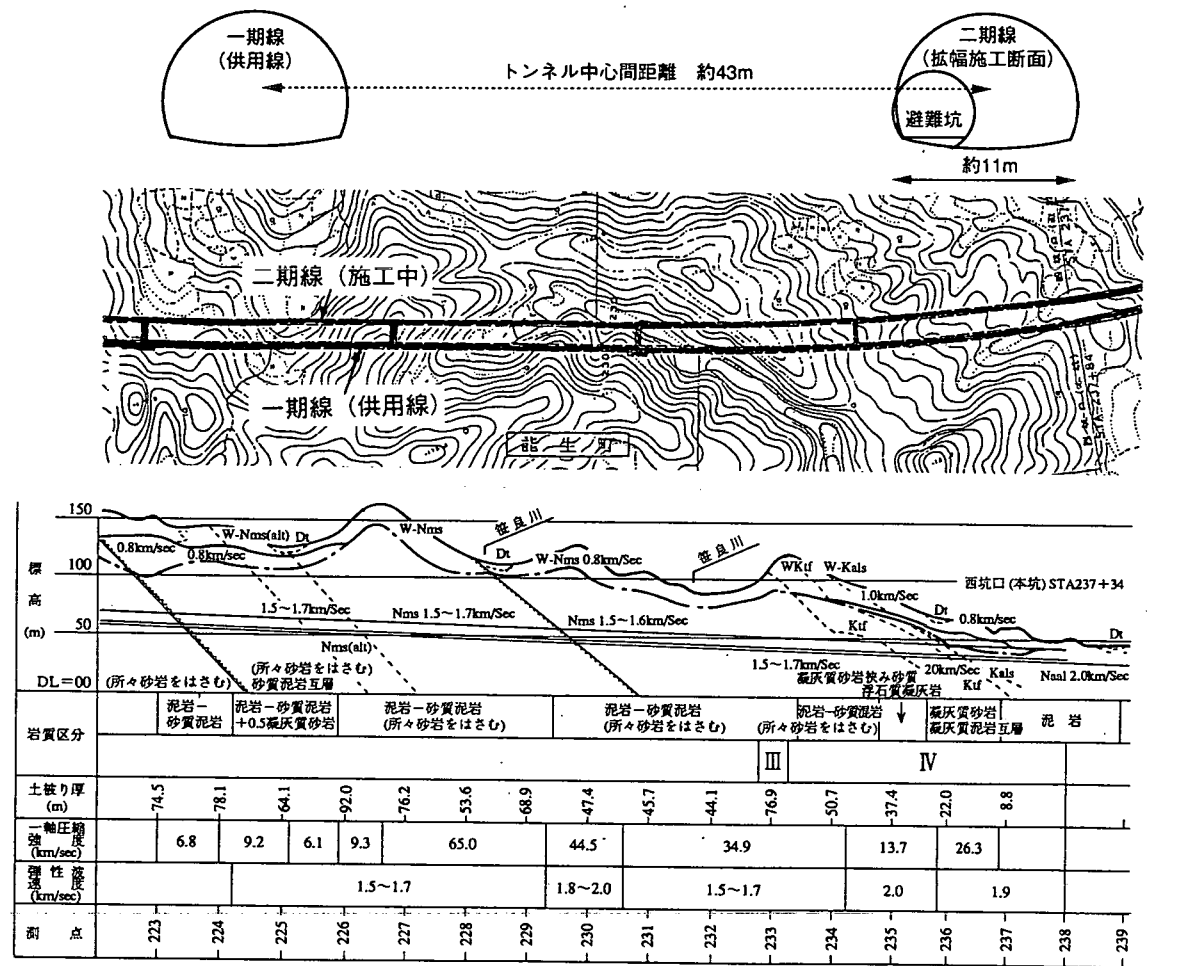


図-1 能生トンネル西工事の地形と地質

3. 内空変位による支保パターンの選定手法

3.1 施工管理基準値の考え方

トンネルを掘削する場合の基本は、①トンネル周辺地山を破壊しない、②支保工を破壊しない、ことである。施工管理基準値を決定するためには、これらを定量的に表現する必要があるが、能生トンネルでは以下の2項目から内空変位の限界値を算定し、これをトンネル掘削時の施工管理基準値（参考値）とした。

①トンネル壁面に発生するひずみが地山の限界ひずみを超えない。

②一次支保工に発生する応力は、許容応力を超えない。

本トンネルでは、避難坑掘削時に実施された岩石試験結果からトンネル全線の岩石の限界ひずみが把握できたため、上記①に関しては施工前に推定することができた。本章では、①と②を関連づけることによって作成した支保パターン選定手法の概念図と、これに基づく情報化施工の考え方を述べた後、能生トンネルで用いた施工管理手法を具体的に述べる。

3.2 内空変位による支保パターン選定手法の概念図

ここでは、限界ひずみと支保工許容応力の2つの内空変位の施工管理基準から作成した支保パターン選定手法の概念について説明する。図-2に示すように、地山の限界ひずみが一定値であれば、支保工規模の大きさに関わらず内空変位による施工管理基準値は一定となる。一方、支保工の許容応力は支保工規模の大きさと図-3に示すような相関関係があり、施工では支保工に発生する応力が許容応力以下となる内空変位を施工管理基準とする必要がある。よって、最終的な施工管理基準は、図-2と図-3の両方を満たす図-4となる。

次に、図-5に示すように等方圧が作用する無限地盤中に支保工を有する円形トンネルを掘削した場合の内空変位 U は、地盤と支保工の剛性値と初期応力の関係より以下の式で求められる。

$$U = \frac{2(1+\nu_r)}{E_r} \frac{1}{1+\alpha} Pb, \quad \text{ここで、} \alpha = \frac{1+\nu_r}{1+\nu_s} \frac{E_s}{E_r} \frac{b^2+a^2}{b^2(1-2\nu_s)+a^2} \dots\dots\dots (1)$$

$E_r, \nu_r, \nu_s, P, a, b$ を定数、 E_s を変数とすると、式(2)が得られる。

$$U = \frac{C_1}{1+\alpha} = \frac{C_1}{1+C_2 E_s}, \quad \text{ここで、} C_1 = \frac{2(1+\nu_r)}{E_r} Pb, \quad C_2 = \frac{1+\nu_r}{1+\nu_s} \frac{1}{E_r} \frac{b^2+a^2}{b^2(1-2\nu_s)+a^2} \dots\dots (2)$$

よって、内空変位と支保剛性との関係は図-6となる。この図6と図4を重ね合わせると、内空変位によって適正な支保パターンを選定するためのノモグラフ(図-7)が完成する。

次に、この図-7による支保工規模の妥当性の評価と適切な支保工の選定方法を説明する。

ある断面において、断面剛性 S_1 の支保工が施工されたとする。切羽が $0.3D$ (D はトンネル直径) ほど進行すると、最終内空変位 U_1 は、初期変形率³⁾や過去の実績に基づく方法⁵⁾などより推定できる。 U_1 が図に示すように施工管理基準値を超えている場合には、支保工をより重いものに変更しなくてはならない。そこで、その断面の地盤剛性曲線に沿って支保を重くし、施工管理基準値と一致した値 U_2 のときの断面剛性 S_2 の支保工が、その断面に最適な支保工となる。また同様に、ある断面において断面剛性が S_3 の支保工が施工されたときの、最終変位予想値が U_3 とする。 U_3 が施工管理基準値より小さい場合には、その地盤剛性曲線に沿って支保を軽くし、施工管理基準値と一致する U_4 のときの断面剛性 S_4 が、その断面に適した支保工と考えられる。

以上より、最終内空変位が予測できれば、このノモグラフを用いて現在使用している支保パターン規模の妥当性が評価できる。また、変更の必要がある場合には、どの程度の支保パターンを選定すれば適切な支保であるのかを判定することができる。

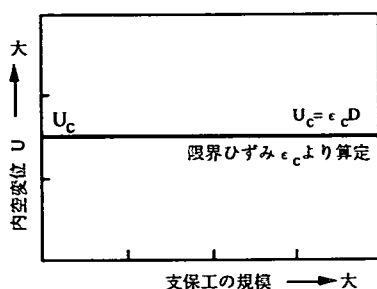


図-2 限界ひずみによる
許容内空変位

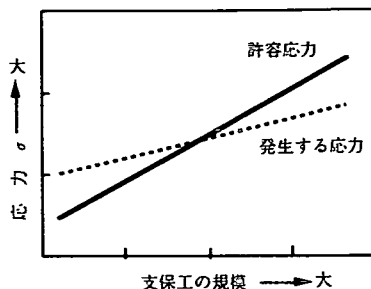


図-3 支保許容応力による
許容内空変位

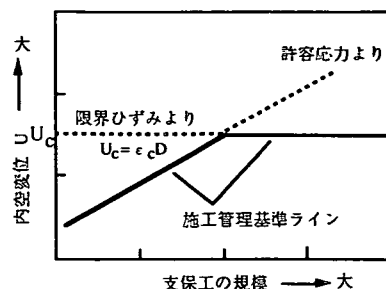


図-4 施工管理基準ライン

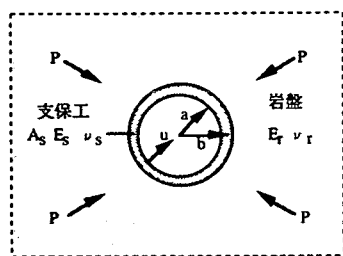


図-5 円孔の弾性理論解のモデル

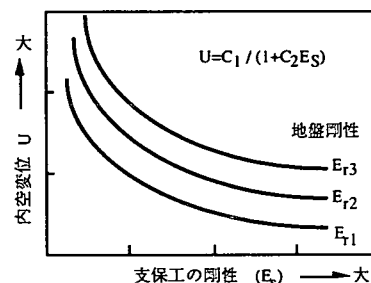


図-6 内空変位と支保工剛性

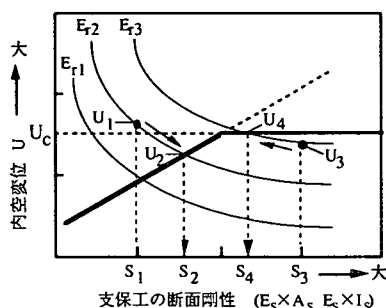


図-7 支保パターン選定の
ノモグラフ

3.3 限界ひずみによる許容内空変位の設定

桜井は、地山材料の破壊基準がひずみによって与えられれば、推定されたひずみから応力解析を行うことなくトンネルの安定性を評価できるとした。また地山の変形を限界ひずみ内に抑えることで、トンネルの安定性を保持する手法も示した。そこで能生トンネルでは、できる限り地山の変形を弾性変形挙動範囲以内に抑制することで、地山の膨張・塑性流動的な変形によるトンネルの不安定性を回避することができると考えた。

図-8 には一軸状態での応力～ひずみ曲線を示す。ここで限界ひずみ ϵ_0 とは、現位置試験や室内試験より求められる破壊ひずみ ϵ_f を地質などに応じて低減したもので、一軸圧縮強度 σ_c 、初期弾性係数 E_i としたとき、 $\epsilon_0 = \sigma_c / E_i$ と表現されるものである。

図-9 には、能生トンネル西工事の避難坑全線にわたる岩石試験から求めた破壊ひずみの分布を示す。これより破壊ひずみは、中央値として $\epsilon_f = 0.85\%$ を得ることができた。また、岩石試験の応力～ひずみ曲線から、限界ひずみは破壊ひずみの60～80%であることがわかった。よって、能生トンネルの施工管理に用いる限界ひずみは、破壊ひずみの60% ($\epsilon_0 = \epsilon_f \times 0.6 = 0.51\%$) とした。さらにここでは、全線の地質は泥岩主体で変化が少ないことから、限界ひずみを全線一定であると仮定した。

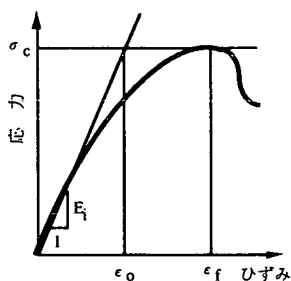


図-8 応力～ひずみ曲線

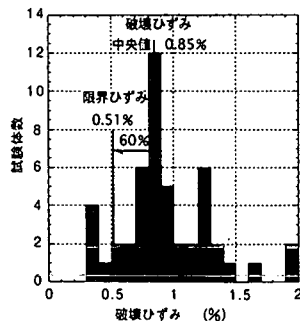


図-9 破壊ひずみの分布

許容内空変位を決定するためには、内空変位を計測する前の先行変位を考慮し、掘削解放率を決める必要がある。一期線施工時に、避難坑から一期線に向けて設置した地中変位計測より、先行変位を計測した結果⁴⁾によると、最終全変位量に対し上半切羽到達時点での先行変位率は10～20%であった。しかし、内空変位の計測開始時期は上半切羽到達時点より遅れることから、掘削解放率を30%とした。よって、トンネル壁面に発生するひずみを地山の破壊ひずみと限界ひずみ以内に抑制するための内空変位 U_f 、 U_o は、式(3)、(4)から求められる。

$$U_f = \epsilon_f \times 11.2\text{m(トンネル長軸直径)} \times 0.7(\text{掘削解放率 } 30\%) = 65\text{mm} \dots\dots\dots (3)$$

$$U_o = \epsilon_o \times 11.2\text{m(トンネル長軸直径)} \times 0.7(\text{掘削解放率 } 30\%) = 40\text{mm} \dots\dots\dots (4)$$

以上より、地山の限界ひずみから算定される許容内空変位は、全線一律 40mm とした。

3.4 支保工許容応力による許容内空変位の設定

支保工に発生する応力は許容応力と比較することにより、許容内空変位を定めることが可能である。能生トンネルでは、避難坑幅の掘削手順に従って二次元弾性 FEM 解析を行い、各支保パターンに発生する応力と内空変位の関係を求めた。ここでは、4 種類の一次支保パターン(DI-3、DI-i、DI-4 および DI-5)について、地山剛性を $E_r=350\sim10,000\text{kgf/cm}^2$ に変化させた場合を算定している。許容内空変位は、支保工の天端と肩部の解析によって得られた軸力と曲げモーメントから縁応力を求め、支保工の許容応力と比較することにより算定した。解析では、 $\sigma_c=180\text{kgf/cm}^2$ の吹付コンクリートと SS400 の H 鋼の許容応力を用いた。

図-10 は、土被り 50m の場合の限界ひずみと支保工に発生する応力から算定した許容内空変位を示すノモグラフである。このノモグラフにより施工中の支保工の妥当性を評価し、地山に適した支保パターンが選定可能である。なお、ここで行った FEM 解析での条件は、表-1 に示す。側圧係数や掘削解放率は、土被りが 50m 前後での計測結果（内空・天端変位と吹付応力など）に対して逆解析により設定した。このノモグラフの使用方法は、3.2 節に示したとおりである。

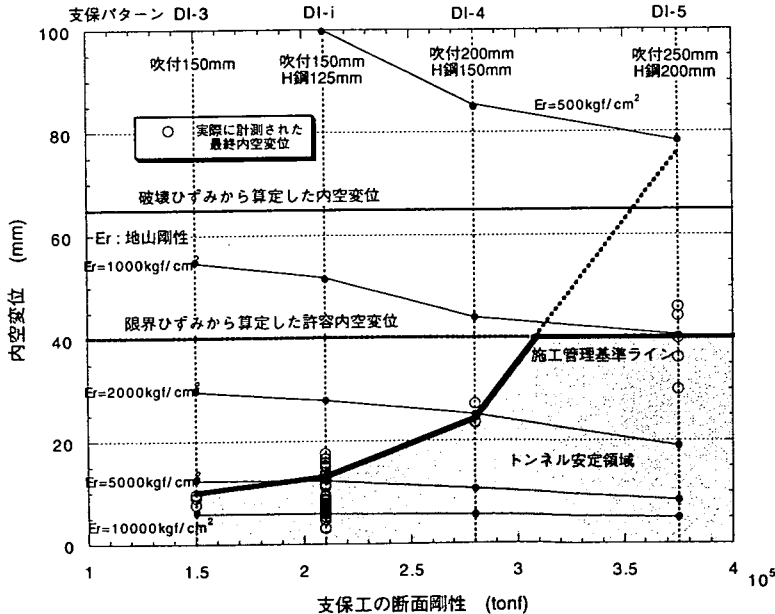


表-1 解析条件

解析手法	二次元弾性FEM解析	
土被り	50	m
単位体積重量	2.2	ton/m ³
側圧係数	1	
掘削解放率	65	%
地山剛性	350～10,000	kgf/cm ²
地山*アソビ	0.35	
吹付コンクリート剛性	100,000	kgf/cm ²
H 鋼剛性	2,100,000	kgf/cm ²

図-10 支保パターンの妥当性評価の選定手法を示すノモグラフ（能生トンネル西、土被り 50m）

4. 能生トンネルでの適用結果

図-10 の支保パターン選定図には、能生トンネルの STA.235～228 のうち、土被りが 40～60m 区間で実際に施工された支保パターンと計測された最終内空変位（上下半内空変位の平均値）を重ねてプロットした。これより、最終内空変位は、ほぼ支保パターンごとに定めた許容内空変位以下となっており、ここで定めた施工管理基準ラインは、妥当なものであったと思われる。

以上より、本手法は有効な支保パターンの選定方法であると考えられる。よって、NATMトンネルでは図-10 のノモグラフを事前に作成して情報化施工を行えば、効率的に適正な支保パターンの選定が可能であると思われる。

5. まとめ

本報告では、内空変位による支保パターン選定手法の妥当性を、能生トンネル西工事において検討した結果について述べた。以下にここで得られた知見を示す。

- ・実際の最終内空変位は、ここで定めた許容内空変位以内にほぼ収まった。よって、一期線と避難坑掘削時の岩石試験や計測結果から設定した許容内空変位は、二期線施工時に有効活用できることがわかった。
- ・実際に施工された支保パターンは、本手法で選定した支保パターンと同様であり、安定性が確保されていた。従って、本支保パターンの選定手法は妥当なものであると考えられ、今後他の NATM トンネルでも、本手法を用いることにより、効率的に適正な支保パターンの選定が可能と思われる。

今後の課題としては、以下のことが考えられる。

- ・多くのトンネルでは、本トンネルのように一期線データがあり、そのデータを利用できることは少ない。本手法では、限界ひずみを全線一定とすることができたが、地質が頻繁に変化する地山では、限界ひずみを求めながら施工しなくてはならず、本手法の適用は難しい。しかし、ポイントロード試験機のような簡易原位置試験により、施工中容易に限界ひずみが求められれば、本手法の適用性が広がると思われ、今後検討したい。
- ・本手法は、許容内空変位による施工管理手法であるため、破壊ひずみの小さい硬岩地山、亀裂が地山挙動を支配する地山や、地山が弾性挙動を示さない土砂地山などでは適用が困難である。よって、その場合には他の施工管理手法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 桜井：トンネル工事における変位計測結果の評価法，土木学会論文集，第 317 号，pp.93-100, 1982.1.
- 2) 谷本，吉岡：山岳トンネルにおけるコンバージェンス計測の意義，材料，第 40 巻，第 452 号，pp.122-128, 1991.
- 3) 谷本，吉岡：変形に基づくトンネル地山分類の提案，材料，第 41 巻，第 463 号，pp.424-429, 1991.4.
- 4) 佐藤，安川，矢野，桑田：能生トンネルの変位特性と支保効果，トンネルと地下，第 18-9，pp25-35, 1987.9.
- 5) 吉川，朝倉，日吉，遠藤：NATM 計測実績の統計分析，第 15 回岩盤力学に関するシンポジウム，1983.