

Attempt a New Three-Dimensional Support System for NATM Tunneling

小 森 博 (こもり ひろし)

日本鐵道建設公団 北陸新幹線建設局局長

堀 地 紀 行 (ほりち のりゆき)

日本鉄道建設公団 本社リニア建設室補佐

熊耳 哲雄 (くまがみ てつお)

日本鉄道建設公団 北陸新幹線建設局工事第二課長

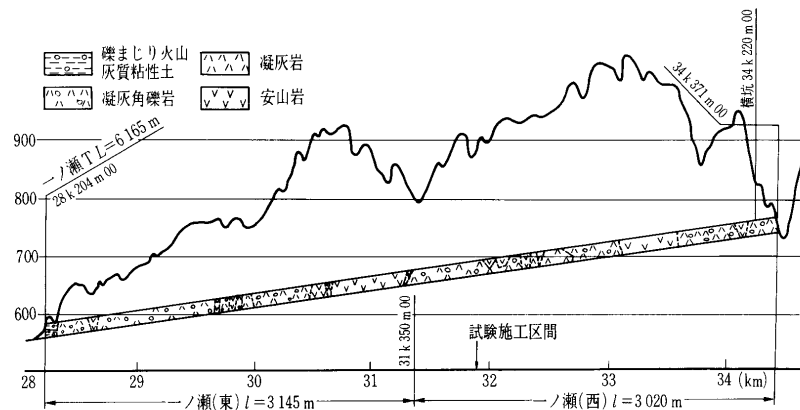
大 津 宏 康 (おおつ ひろやす)

大成建設(株) 土木設計部 課長代理

1. はじめに

「良質な物を安く提供する」という課題は、土木技術者はもとより、すべての生産活動に携わる技術者にとって、いわば永遠のテーマでもあり、現代社会における経済活動の根幹を成するものとも思われます。北陸新幹線の一ノ瀬トンネルで、一部区間において試験施工した新しいトンネルの支保設計は、困難なトンネル工事に直面し、いわば冒頭のテーマに向けて少しでも近づきたいと考えた筆者らの、ささやかな試みの一端を表現したのもでもあります。本稿のプロローグとして付記しました。

さてここで、一ノ瀬トンネルについて簡単に紹介すると、このトンネルは、日本鉄道建設公団の手によって工事が進められている北陸新幹線高崎・長野間約126kmの路線にあって、高崎を起点として約30kmほど西進した群馬県内に位置している。またトンネルの延長は6165mと、トンネルとしては長大に属する(図一1)。



図一2 一ノ瀬トンネル地質縦断図，試験施工区間

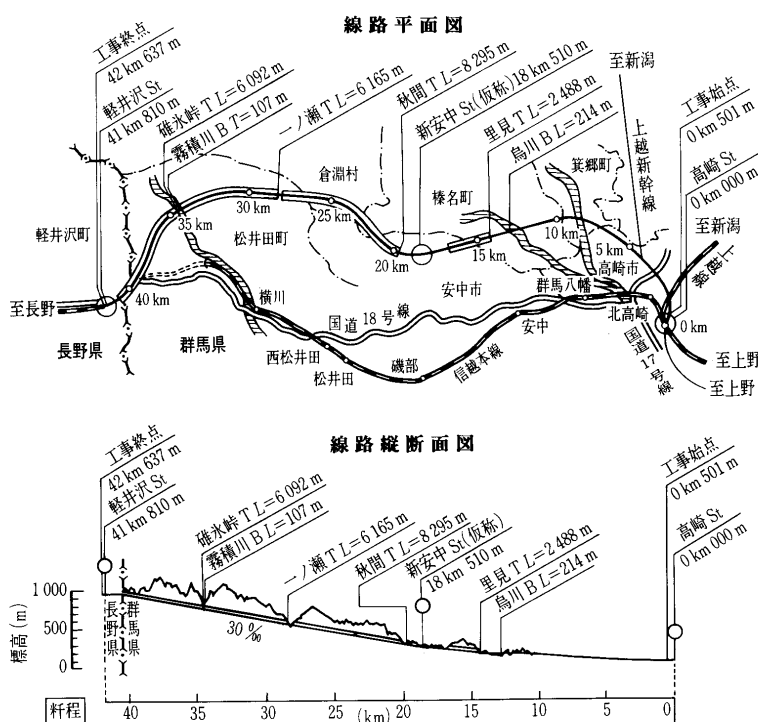
この付近の地形地質は、榛名山をはじめ周辺の火山の活
 発な活動により、複雑な地層構成が見られる山岳地帯で、
 当初より難工事となることは予想していたが、その予想
 をも越えるものとなった。難工事の原因となった地質は、
 周辺の火山活動によって堆積した凝灰岩、凝灰角礫岩、
 火山角礫岩を主体に、安山岩溶岩も貫入した複雑な構造
 を成し、一部に膨圧性地質や多量の湧水区間も存在した。

施工は、山岳トンネルの標準工法である NATM で行われた (図-2)。

主題である三次元支保は、難工事となった一ノ瀬トンネルの中央部付近、多量の湧水を伴った膨圧性の凝灰角礫岩層で実施された。

2. 三次元支保

一般的に NATM における支保の当初設計は、ボーリングなどの地質調査の結果を基に、トンネル施工位置の地山を岩盤分類表により区分し、これに地質条件として、地山の弾性波速度や地山強度比を与えて、吹付けコンクリートの厚さ、ロックボルトの本数やサイズ、ならびに支保工の有無やそのサイズを決定している。ここで、当初設計とことわっているのは、施工中において、切羽に現れる地質により、しばしば支保の設計を変更するからである。このように NATM の支保設計は、施工中の支保の変更も含めて、地山が同一の条件と評価されれば、地



図一 1 北陸新幹線（高崎・軽井沢間）

* 本稿は土木学会論文集に掲載予定の「NATMにおける支保構造の三次元効果とその評価について」の一部を新たにまとめたものである。

山内に均一の支保を連続させることになる。

こうした背景には、本来であれば幾何学的に見ても三次元として取り扱われるべきトンネルの力学挙動を、NATMの導入期においては解析手法の制約などから平面ひずみ状態を仮定した二次元問題として支保の設計を説明してきたこともその理由の一つと考えられる。

筆者らがたどった過程を整理すると次のようになる。すなわち、現行のNATMの施工と支保設計から浮かび上がってくる事実は、当然ながらトンネルの支保は地中の三次元空間に存在するという。切羽の進行に伴いトンネル周辺の地山は、三次元応力状態にあるということ。既往の支保設計は、トンネル縦断方向の応力は考慮していないということである。

次に構造物に目を向けてみると、身近なものとして箱桁が挙げられる。荷重載荷時の箱桁の応力状態は、トンネル掘削時のトンネル周辺地山の応力状態とは当然異なるが、空間に断面を保持するためダイアフラムといった構造工学的な工夫が計られている。自然界に繁茂する植物の竹も、細くかつ中空の身ながら、高く伸びて行くために節を持っている。また水圧にさらされる船体構造も、断面の補強としてリブやダイアフラムが設けられている。このことから三次元空間において効果的な形は、断面形状として均一な構造よりも、むしろ縦

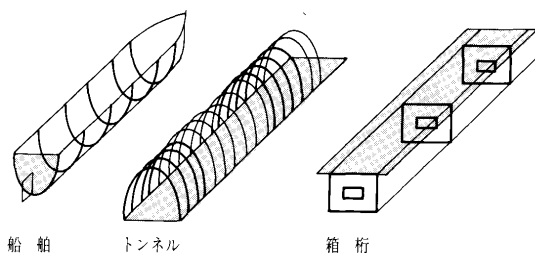


図-3 三次元構造の概念図

断的にも断面が変化する形ではないかと思ひ当たる(図-3)。

設計に関し、一般の構造物と山岳トンネルが大きく異なる点は、一般の構造物は、荷重が既知量として作用し、構造物に発生する応力や変位を議論するが、トンネルは、掘削時の断面の分割の方法や支保構造によって、支保構造に作用するトンネル周辺地山の応力や変位が変化する

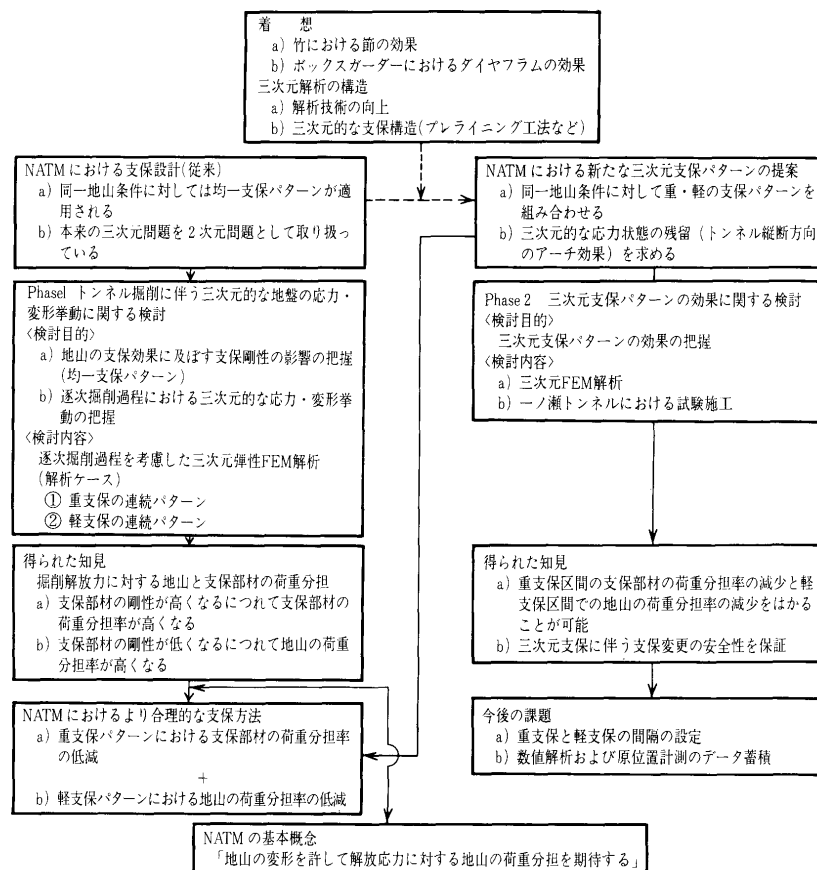


図-4 三次元支保の検討フロー

ため、単に支保構造の議論にとどまらず、支保構造と地山にとって最適な応力と変位の状態を選択するといった最適値問題と理解できる。三次元として支保構造を考えた場合、地山と支保構造にとって優位に働くことが絶対的な条件である。ここでトンネルの安定性を論ずる際に必ず用いられる概念は、地山のアーチ効果であり、三次元支保は、支保構造の変化により、地山のアーチ効果をトンネルの縦断方向にも発現させたいと考えた形である。

以上のような過程を踏まえて、地山判定から本来であれば均一な支保を連続すべきところを、あえてトンネルの縦断方向について支保剛性に強弱を持たせるといった三次元支保を考案した。この支保の力学特性としては、トンネル周辺地山については縦断方向のアーチ効果の発現を、また支保構造としては、薄肉円筒構造に見立てた

表-1 解析用物性値

			弾性係数 E (kgf/cm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ (tf/m ³)	静止土圧係数 K_0	
岩 盤 (ソリッド要素)			2 500	0.3	2.0	1.0	
			弾性係数 E (kgf/cm ²)	ポアソン比 ν	断面積 A (cm ²)	断面二次モーメント I (cm ⁴)	仕様
支保工	吹付けコンクリート (シェル要素)	重支保	2.2×10^5	0.2	2 000		$t=20\text{cm}$
		軽支保	2.2×10^5	0.2	1 000		$t=10\text{cm}$
	鋼製支保工 (ビーム要素)	重支保	2.1×10^6	0.2	63.53	4 720	H-200
		軽支保	2.1×10^6	0.2	21.90	383	H-100

工事報告

際のリブやダイアフラムの効果を期待した。

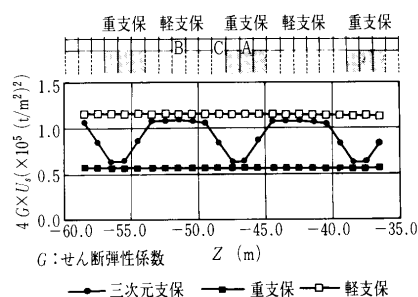
3. 三次元弾性 FEM による予備解析と試験施工

三次元支保の着想から試験施工までの流れと、試験施工の結果ならびに今後の課題を簡単に整理した三次元支保の検討フローを図一 4 に示す。

ここで、三次元 FEM 弾性解析は、同一の地山物性値に対して次の 3 ケースについて行った。解析用物性値を表一 1 に示す。

- 1) 重い支保（重支保）を連続させるケース
- 2) 軽い支保（軽支保）を連続させるケース
- 3) 軽い支保 6 基、重い支保 3 基の計 9 基を 1 サイクルとした三次元支保のケース

この一連の解析の結果から、その一つとして、トンネルの安定性を評価する場合に、重要な指標となる形状弾性ひずみエネルギー²⁾の 3 ケースの分布状況を図一 5 に示す。



図一 5 形状弾性ひずみエネルギーの分布状況

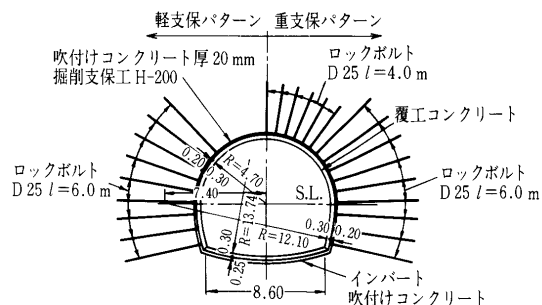
このグラフで z 軸の値は切羽から計った後方での位置を示す。三次元支保における重支保区間の中央部の形状弾性ひずみエネルギー U_i は軽支保区間の影響を受け、均一な重支保に比べて、多少大きめの値をとり、また三次元支保の軽支保区間は、重支保区間の影響を受けて、均一な軽支保に比べて形状弾性ひずみエネルギーは多少小さめの値となった。さらに三次元支保における重支保と軽支保のすりつき部では、均一な重支保の値と均一な軽支保の値の中間的な値を示している。この解析結果から、三次元支保では、軽支保区間と重支保区間のお互いの支保剛性の違いが、トンネル縦断方向にも相互に影響し合い、地山の形状弾性ひずみエネルギーに変化を与える。つまり、軽支保区間の高い形状弾性ひずみエネルギーが、重支保区間の低い形状弾性ひずみエネルギーに配分されたと見なすことができ、重支保と軽支保の支保剛性と設置間隔の設定によって、弾力的かつ合理的な支保の設計が可能であることを示している。また、ここでは地山を弾性体と見なして評価しているが、クリープ現象を呈する地山などでは、掘削後の地山応力の再配分などを考慮すると、三次元支保の効果はさらに有効性を増すものと思われる。

こうした解析の結果を裏付けに、三次元支保の試験施工と現場計測を実施した。

試験施工区間の地質は、転石を含む凝灰角礫岩層で、

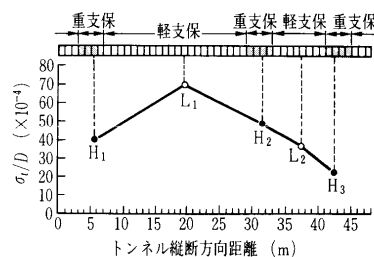
湧水も生じ、施工は困難なものとなった。このため、施工を優先し重支保と軽支保の支保剛性の強弱は、ロックボルトの本数のみで差異をつけることにした。

図一 6 に試験施工区間に設定した三次元支保の重支保パターン（右）、軽支保パターン（左）を示す。



図一 6 試験施工区間の支保パターン

図一 7 には収束した天端沈下量 (δ_t) をトンネル最大幅 (D) で無次元化した天端沈下係数の分布状況を示す。 H_2 , L_2 , H_3 の 3 点に着目すると、 H_2 の値が 0.005 程度であるのに対し、 H_3 の値は 0.002 程度と減少している。これは、 H_2 の値は、掘進方向に対し手前に長く続く軽支保区間の影響を受け、比較的大きな値を示したものと考えられる。一方、 H_3 の値は、 H_2 付近の重支保区間の影響を受けて、天端沈下係数が、 H_2 の値に比べ低く抑えられたと考えられる。また、 L_2 の天端沈下係数は、 H_2 , H_3 付近の重支保区間の影響を受け、 L_2 は、重支保と等価な天端沈下係数を示している。



図一 7 天端沈下係数の分布状況

4. ま と め

このように試験施工からも、事前の FEM 解析の結果とほぼ同様の傾向が把握され、三次元支保の有効性が確認された。

今後の課題としては、重支保、軽支保の基数や間隔の設定などが挙げられるが、さらなる現場での検証や数値解析の事例を蓄積し、合理的な支保の設計を目標に、充実に図りたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針（案），1983.
- 2) 松本嘉司・西岡 隆：トンネルの設計理論，共立出版，1992.