

（株）奥村組 河原畑良弘○寺田道直 杉本博史

（株）間組 古賀哲決 沼田行弘

1. はじめに

トンネルの設計・施工は、従来、経験に基づいて行われるものであり、計測が直接工事に役立つとは考えられていなかった。すなわち、現場計測はトンネル技術者にとっては無用であるばかりか、むしろ工事の障害となり、工期を遅らせるものになるという認識すらあった。しかし、現場計測工法とも言えるべきNATMの導入を契機とする最近のトンネル技術の進歩・発展はめざましく、このような認識を一掃するとともに従来の経験工学から脱脚し、現場計測と理論に立脚した新しい設計・施工の理念が確立されつつある。

NATMは科学的な現場計測と計測結果の力学的分析を基本とするシステマチックな計測管理によって、設計・施工の最適化をはかろうとする合理実証型のトンネル工法である。このため、施工中に実施する現場計測によって、地山の力学的挙動を施工過程に応じて速やかに把握するとともに、その結果を分析・評価し、直ちに設計・施工にフィードバックさせることによって、各掘削段階における施工の安全性を保証し、さらに、工事の経済性・合理性を確保するといった計測管理が行われる。このような計測管理の考え方については既にいくつかの報告や提案がなされ、徐々に具象化されつつあるものの、多現象支配下の地山挙動は複雑であること、導入後日も浅く知識や理論の体系化が遅れていることなどの理由から、その手法は確立されたものとは言い難く、現在、試行錯誤の状態にあるといえる。このため、現場計測によって貴重な情報を収集しながら、それらを有効に利用し得ていない場合や測定項目がやたらと多く、計測のための計測に留まっている場合も見受けられる。

本報告では、まずNATMの基本概念を簡単に述べ、次に現場計測の意義と計測管理の位置づけを示し、最後に本題のNATMにおける計測管理の現状と問題点について述べる。

2. NATMの基本概念

地山内に空洞を開削すると空洞分の岩盤が受けていた荷重はそのまわりの地山で分担され、応力の再配分が起こる。開口部周辺では空洞内へ向う半径方向の変形（空洞周壁の収縮）とともに接線方向の応力が増加し、岩盤の力学特性や切羽の進行により一定しないが、ある時間がたてば空洞周辺は新しい応力状態へ移行する。この応力が岩盤の強度より小さければ、接線方向の応力が増加した空洞表面の岩盤層は支持リングとして働き、自分自身で空洞を保持している。この場合、空洞内へ向う半径方向の変形は小さく、何らの支保手段をとる事なくして早期に平衡状態に達する。一方、この応力が岩盤の強度に達するならば、適切な時期に適切な方法で、空洞周辺に発生する塑性域の岩盤を保護するとともに半径方向の変形を制御することによって空洞の安定化をはかる必要がある。すなわち、塑性域の岩盤に強度劣化を持たらす有害なゆりみを防止し、時間の経過とともに三軸応力状態へ移行させることによって、塑性域とその周辺の岩盤層は支持リングとしての機能を発揮するようになり、その結果、空洞内へ向う半径方向の変形は徐々に収束し、最終的には平衡状態に到達する。

NATMの基本概念は、このような応力再配分に伴う空洞周辺地山の力学的挙動を、現場計測によってモニタリングしながら、注意深く慎重に制御することによって、岩盤自身が本来有している支持能力を最大限に利用する、すなわち空洞周辺地山を荷重体（Loading body）ではなく、支持体（Load-carrying body）として積極的に活用する、とともにそれに最もふさわしい支保手段を適宜選択していくところにある。この目的を達成するための手段として、一般に、吹付けコンクリート、システム・ロックボルト、フレキシブルな鋼製支保、場合によっては先打ちパイプや補強注入などいろいろな支保手段が採用されるが、これらを地山の状況に応じて正しく選定するとともに適切な時期に用いることによって、閉じたシェルを形成し、空洞周辺の岩盤層に

支持リングとしての機能を発揮させることが重要である。このように、NATMでは空洞周辺の地山自体をトンネル構造の主要な構成要素として組み込んでいるところが、それらをゆるみ荷重として対処してきた従来のトンネル工法と本質的に異なる点であり、この工法の経済性・合理性を裏付ける最も重要な根拠ともなっている。なお、この工法に対する理解不足から、吹付けコンクリートやロックボルトを使用すること自体がNATMであるとの誤った認識が未だに見受けられる。上記の概念から明らかなように、NATMは支保手段を規定するものではなく、その本質は空洞周辺の地山自体に空洞を保持させることによって、安全で経済的なトンネルを構築しようとする考え方そのものにある。

3. 現場計測の意義と計測管理の位置づけ

3.1 現場計測の意義

トンネルの力学的挙動は、図-1に示すように、地山の力学特性、空洞の規模や形状、初期地圧などの多くの要因に支配される。これらの要因とトンネルの力学的挙動との関係を事前に推定し、合理的な設計や施工計画を立案することを目的とした数値解析が、近年、盛んに行われるようになってきた。しかし、数値解析の精度を向上させるためには信頼性

の高いインプット・データを入手しなければならず、そのためには地山についての十分な調査・試験が必要になる。しかし、地質構造の複雑さ、不連続性岩盤に代表される地山の力学特性の複雑さ、初期地圧測定の困難さとその精度の問題、さらには調査・試験におけるデータの平均化(単純化)などを考慮すると、現在の技術レベルでは、いくら十分な調査・試験を行っても、インプット・データへの不確定要素の介入は避け難く、数値解析による予測と実際のトンネルの挙動が異なるのはむしろ当然のことと言える。

このことは、トンネル(NATM)の設計が橋梁などの人工材料を主体とする構造物の設計とは基本的に異なることを示している。すなわち、橋梁においては外力(設計荷重)が既知であり、さらに鋼材やコンクリートなどの構造材料は比較的等方等質で力学特性も既知である。したがって、構造解析によってかなりの精度で構造物の挙動を予測可能であり、解析結果に基づいて構造物の設計を行うことができる。すなわち、調査から施工に致る工事の各プロセスは、図-2(a)に示すように、互いに比較的独立して機能することができる。一方、トンネル(NATM)の設計においては、既に述べた理由によっ

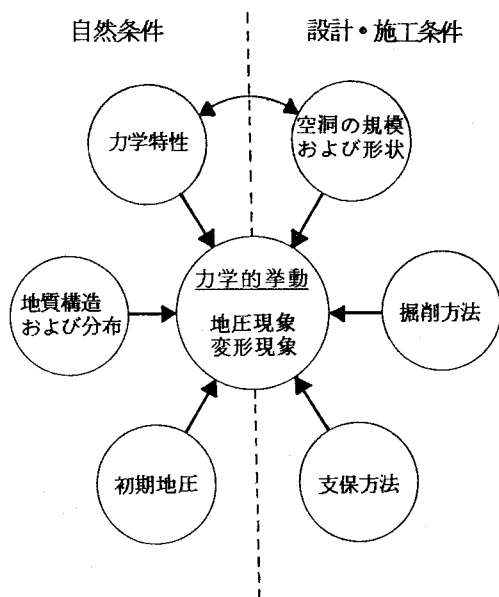
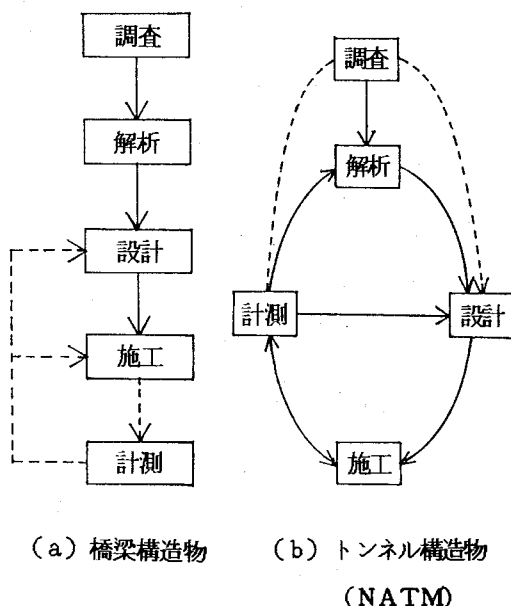


図-1 トンネルの力学的挙動を支配する主要要因



(a) 橋梁構造物 (b) トンネル構造物 (NATM)

図-2 土木構造物の工事プロセスの流れ

て、外力となる地山の初期地圧が明らかでなく、主たる構造材料としての地山の力学特性も不明確である。また、トンネルの複雑な施工過程のすべてを解析に取り入れることは困難であり、さらに数値解析の手法そのものにもおのずと限界がある（地山の力学特性や支保効果を完全に表現し得る能力は持ち合わせていない）。したがって、施工時の実際の地山挙動と数値解析による予測値とはほとんどの場合一致しない。ここで、現場計測の必要性が生ずることになる。すなわち、施工中に実施する現場計測によって、地山の力学情報を収集し、予測値と対比して大きく異なる場合には、施工の安全性と経済性を確保するために、計測結果を直ちに設計（あるいは解析）や施工にフィードバックし、これらの機能を補完（施工計画の変更や場合によっては設計変更を）しなければならない。この場合、図-2（b）に示すように、調査から施工および計測に致る工事の各プロセスは互いに独立ではなく、D O ループのように閉じた関係となる。

このように、トンネルにおける現場計測は必ず施工中に行い、その結果は直ちに設計・施工に反映させなければならない。施工中の現場計測によって得られる力学情報は、初期地圧、トンネルの規模および形状、掘削方法、支保の効果、さらには不連続性、異方性、時間依存性等に起因する複雑な地山の力学特性など、図-1に示したすべての要因の影響が含まれたものであり、これらの情報を有効に利用することによって、初めて、トンネルを安全にしかも経済的に施工することが可能となる。このような意味でトンネル（NATM）における現場計測の意義はきわめて大きいと言える。

3・2 計測管理の位置づけ

土木工事のトータル・マネジメントは対象工事を指定工期内に、安全に、安くしかも適切な品質を維持しながら施工していくための技術者の計画・管理行為を合理的にサポートする目的で行われるものである。しかし、自然の地山を対象（主な構成材料）とするNATMの工事施工においては、材料（地山）そのものを品質管理を通じて人間が創造していくことは実際上不可能であり、また、前節3（1）に述べたように、施工計画等へのインプットとなるトンネルの設計は未だ充分な機能を備えておらず、し

たがって当初の施工計画等は相対的に精度の低いものとなっている。このようなトンネル工事の特殊性が合理的な工事施工を行う、すなわちトータル・マネジメントを行う上での大きな制約となっている。

NATMの計測管理はこのようなトンネル工事のトータル・マネジメントにおいて、当初の不確定要素を排除し、設計・施工の最適化をはかるための技術者の管理行為を合理的にサポートするものとして位置づけされる。さらに、マネジメント・サイクルの時間的スケールやその階層性に着目すれば、NATMの計測管理は時間～日単位のサイクルを構成する作業の管理レベルおよび日～週単位のサイクルを構成する工程の管理レベルにおける技術的および経営的管理行為をサポートするものとして位置づけされる。図-3に示すように、NATMの計測管理は、広義には、力学情報の計測に基づく技術的管理とマネジメント情報の計測に基づく経営的管理の2つの管理システムで構成され、作業の管理レベルや工程の管理レベルにおける技術者の管理行為や意志決定を科学的にサポートするものであると言える。すなわち、技術的計測管理においては、現場計測によって応力や変位などの力学情報を収集し、地山の力学

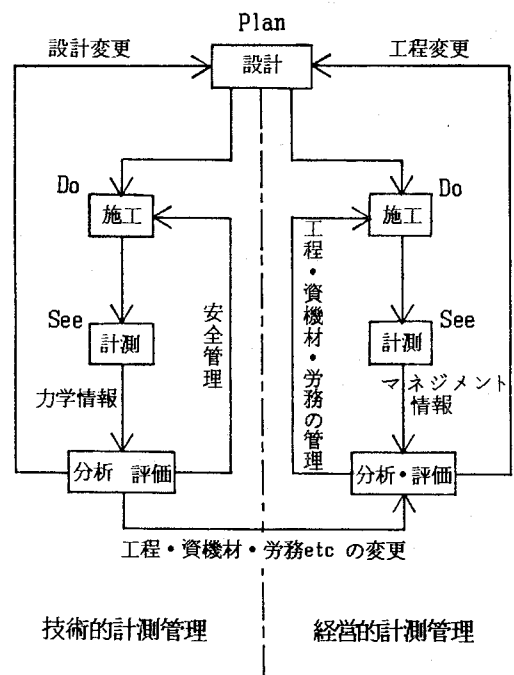


図-3 計測管理の位置づけ

的挙動を把握するとともに、これら进行分析・評価することによって、施工中の安全管理（作業の管理レベル）や必要に応じて設計変更（工程の管理レベル）が行われ、施工の安全性と経済性が追求される。また、経営的計測管理においては、測量データや資機材の納入データなどのマネジメント情報の収集に加えて、技術的管理のアウトプットとしての工程・資機材・労務等の変更情報をも収集し、これら进行分析・評価することによって、作業工程・資機材・労務等の日常管理（作業の管理レベル）や必要に応じて工程変更（工程の管理レベル）が行われ、資源の合理的運用や工期の短縮がはかられる。両者とも施工中の現場計測に基づいて行われる管理であり、図-3に示したように、いくつかのループを形成し、同じような流れで設計および施工にフィードバックされる。

このように、計測管理は、広義には、技術的管理と経営的管理の2つの側面があるが、現在、NATMにおいては技術的計測管理に重点が置かれ、これを目的とした各種の現場計測が盛んに行われている。本文においても、以後、技術的計測管理（以後、単に計測管理と称す）を中心に述べることにする。

4. NATMにおける計測管理の現状と問題点

4・1 計測管理の基本的考え方

NATMにおける計測管理の目的は、現場計測の結果を速やかに設計・施行にフィードバックすることによって、施工の安全性を保証し、さらに経済性を確保することにある。このためには、図-4に示すように、施工中に必ず実施する日常の現場計測（計測A）によって、地山の力学的挙動を施工過程に応じて速やかに把握し、その結果进行分析・評価（管理基準上限値との比較検討）することによって、応急対策や支保パターンの変更（増）が行われ、施工の安全性のみならず構造物としてのトンネルの安全性が保証される。また、地山の状況に応じて計測Bを追加し、地山と支保の力学的挙動を詳細に把握し、その結果を総合的に分析・評価（管理基準下限値との比較、計測結果の総合的解析など）することによって、支保パターンの変更（減）や場合によっては設計変更（再設計）が行われ、工事の経済性・合理性が確保される（図-4参照）。

このような考えを混乱なく速やかに実施工に反映

して行くためには、管理すべき計測項目を厳選し、管理基準とそれに対応する施工上の対策（応急対策、支保パターンの変更など）を力学的解析や既存資料に基づいて事前に準備しておくことが重要である。しかし、当初の管理基準はあくまでも施工の初期段階の目安を与えるものであり、施工中の現場計測に基づいて、必要ならば管理基準を見直さなければならない。また、力学的解析を伴う設計変更（再設計）は設計の基本方針が現実にそぐわないと判断される場合のみ実施すべきであり、可能な限り支保パターンの変更（地山区分の変更）で対処すべきであろう。

4・2 計測管理の現状

(1) 計測項目

NATMの現場計測はその目的によって大きく計測Aと計測Bとに分けられる。計測Aには、表-1に示す坑内観察、内空変位、天端沈下の3項目があり、トンネルの安全確保を主な目的とした日常の管理に使用されている。計測Bは地山の状況に応じて計測Aに追加される選択的計測であり、主に当初の設計や管理基準のチェックに使用されている。計測Bには一般に、表-1の5項目が挙げられるが、現状では、地中変位、ロックボルト軸力、覆工応力の3項目が比較的多く採用されている。また、土被りの浅い条件下においては、地表・地中沈下の測定が計測Aと同レベルで実施されている。

(2) 計測器の種類と計測方式

計測器は変換部の方式によって大きく機械式と電気式とに分けられる。機械式は耐久性、長期的安定性等に優れている反面、迅速性に欠け、連続観測も不可能である。一方、電気式はその逆の特性を持っている。NATMで使用される内空変位と天端沈下の計測器は、計測技術上の問題から、現在のところ機械式の計測器（分解能0.01～1mm程度）に限られているが、その他の計測項目については、差動トランス、ひずみゲージ、ポテンシオメータ、電磁誘導などを利用した電気式の計測器（精度0.5～2%FS程度）があり、工事条件や地山の状況等によって、適当に選択されている。しかし、現状では、主として耐久性、安定性および価格の問題から、機械式の計測器が大半を占めている。

この状況を反映して、計測方式も手動計測が大半

表-1 NATMにおける現場計測の項目

計測種別	計測項目	計測によって得られる情報（項目）
A	坑内観察調査	1.切羽の自立性、素掘面の安定性 2.岩質、断層破碎帯などの性状把握 3.吹付けコンクリート等、支保工の変状把握 4.当初の地山区分の再評価
	内空変位測定	変位量、変位速度、変位収束状況、断面の変形状態により、 1.周辺地山の安定性 2.一次支保の設計施工の妥当性 3.二次覆工の打設時期 などを判断する
	天端沈下測定	トンネル天端の絶対沈下量を監視し断面の変形状態を知り、トンネル天端の安定性を判断する
B	地中変位測定	トンネル周辺のゆるみ領域、変位量を知り、ロックボルトの長さ、設計、施工の妥当性を判断する
	ロックボルト軸力測定	ロックボルトに生じたひずみから、ロックボルト軸力、効果の確認、ロックボルト長、ロックボルト径の判断
	覆工応力測定	一次覆工の背面土圧、吹付けコンクリート内応力
	地表地中の沈下測定	トンネル掘削による地表への影響、沈下防止対策の効果判定、トンネルに作用する荷重範囲の推定
	坑内弾性波速度測定	1.当初の地山区分の再評価 2.ゆるみ領域 3.地層のき裂、変質の程度 4.岩盤としての強度の把握

を占め、昭和53年度以降のNATM採用現場の実態調査¹⁾によると、自動計測の導入率は全体の約18%と低い値を示し、自動化の対象項目も上記の問題から、主に地中変位、ロックボルト軸力、覆工応力に限定されている。また、自動計測の導入によって、計測作業の省力化、迅速化などの効果が得られている反面、計測器のメンテナンスの問題や信頼性の問題が指摘されている。

(3) 計測器の配置と計測間隔

計測器の配置は、掘削方式、トンネルの断面形状、地山の状況等によって、最適な配置が当然異なってくるが、上半ベンチ掘削方式の場合、一般に図-5に示すような配置が採用されている。全断面掘削方式の場合には、同図において内空変位の上部3測線が不要であることは言うまでもない。

計測間隔は工事条件や地山の状況により大きく異なり、日常の計測A（坑内観察は除く）は10～50mに1断面の割合で、また、計測Aに計測Bを加えた主計測断面（図-5参照）はおおよそ200～1000mに1断面の割合で設置されている。なお、主計測断面は一般に代表的な地質の区間に設置されているが、断

層・破碎帯等の分布が限られた特殊区間に設置されている場合も見受けられる。また、生きたデータを取るためには、計測断面を出来るだけ切羽に近づけて設置すべきであるが、作業の安全性や計測器の防護の問題から、現状では0.5～数mの範囲で設置されており、切羽によるばらつきが認められる。

(4) 計測頻度

計測A（坑内観察は除く）の測定頻度は、NATMの導入初期の段階では、主に掘削後の経過日数に応じて定められている場合が多かったが、最近では、変位速度に切羽からの離れを加えた2つの要因に基づいて定められることが多くなっている。その1例を表-2に示す¹⁾。なお、計測Bの測定頻度は一般に計測Aのそれに準じられている。

(5) 計測結果の利用

地山の安定性の判定に最も広く利用されている計測は内空変位の計測であり、安定性の他に、施工の妥当性、2次覆工の打設時期などの判定が、変位量、変位速度および変位の収束状況に基づいて行われている。天端沈下はトンネル天端の安定性の判定に利用され、土被りが浅い場合には、地表沈下とともに

重要な指標となっている。坑内観察は切羽の自立性、地質構成、支保の変状等の把握と当初の地山区分のチェックに利用されている。地中変位とロックボルトの軸力計測は現在の支保の妥当性を検証し、設計変更（再設計）の要否を判定するための重要な情報として利用されている。

最近では、内空変位や地中変位などの変位計測結果を入力データとして逆解析を行い、次の施工段階における地山の挙動を予測することによって、トンネルの設計や施工の最適化をはかろうとする試みや、実測変位に基づく簡単な計算によって、トンネル周辺地山のひずみ分布を求め、これによってトンネルの安全性を評価し、設計や施工にフィードバックしようとする試みが成されている。

(6) コンピュータの利用

NATMの計測管理にコンピュータを導入している現場は、前記の調査によると、全体の約36%を占めている。導入機種は、当初はミニ・コンピュータが主体であったが、最近では安価で使い易いパーソナル・コンピュータが大部分を占めている。ハードウェア構成は、コンピュータ本体に周辺装置としてプリンタ、プロッタ、ディスプレイ装置、キー・ボ

ードおよび補助記憶装置を装備した構成が最も一般的である。計測データ処理システムを計測データの入力方式で分類すると、次の3システムに整理される。

- ① 手動システム（キー・イン方式）
- ② 半自動システム（データ・レコーダ方式）
- ③ 自動システム（リアルタイム方式）

現状では、①の方式を採用している現場が約80%と大半を占め、①と②あるいは①と③を組合せた併用方式が約20%となっている。なお、計測データは全て現場のコンピュータで処理され、他の大型コンピュータに接続しているケースはみられない。しかし、いずれの方式にせよ、コンピュータの導入によって、図表処理などの計測データ処理の省力化、迅速化、精度向上および規格化などにおいて大きな効果が上げられている。

4.3 計測管理の問題点

(1) 計測における問題点

a) 計測器設置上の問題

計測器は掘削後早期にしかも切羽の近くに設置すべきであるが、このような状況での設置作業は危険を伴い、計測器も破損し易く、その防護が難しい。

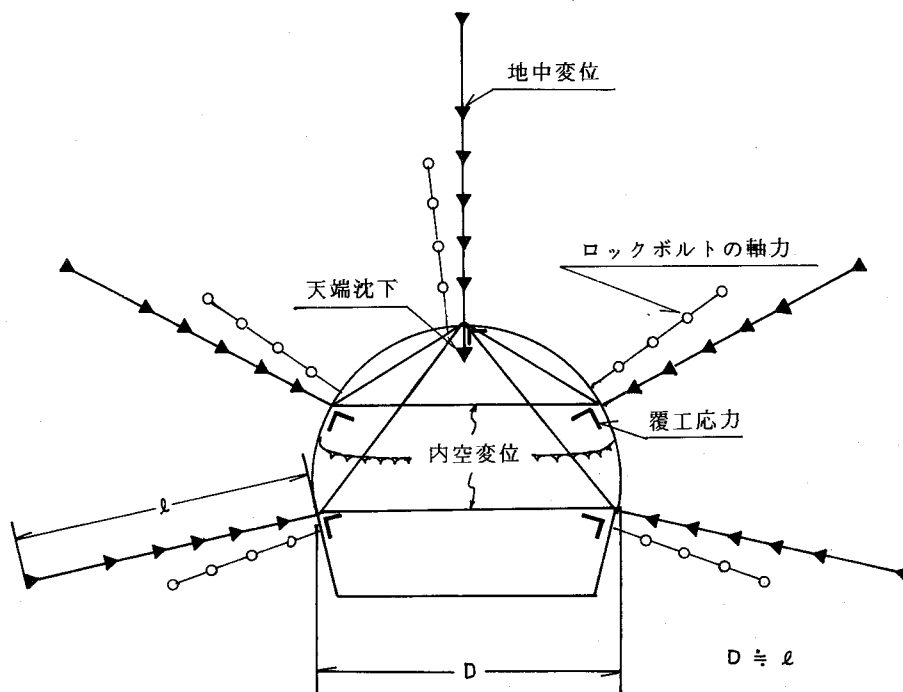


図-5 主計測断面（上半ベンチ掘削方式）

表-2 計測A（切羽観察は除く）の測定頻度¹⁾

測定頻度	変位速度	切羽からの離れ
1～2回／1日	10mm／日以上	0～1D
1回／1日	10～5mm／日	1D～2D
1回／2日	5～1mm／日	2D～5D
1回／1週	1mm／日以下	5D以上

D：トンネル掘削幅

b) 計測器の信頼性の問題

信頼性の高い計測を行うには、計測のたびに較正を行う必要があるが、電気式計測器は埋設されると較正が困難なため、機械式に比べ信頼性に欠ける。

c) 自動計測の問題

電気式計測器を用いた自動計測は安全で、迅速性に富み、連続観測が可能であるが、耐久性や信頼性に欠ける面があり、計測費用も高価である。また、自動化によって、切羽の観察が雑になるといった弊害も生じている。

d) 手動計測の問題

現状では、信頼性と費用の点から、機械式計測器を用いた手動計測が採用されることが多いが、計測作業に長時間を要するため、他の坑内作業に支障を来す場合が多い。

e) 計測空間の問題

現在の計測は点あるいは線の計測でしかなく、2次元あるいは3次元の領域としての計測とはなっていない。

(2) 管理における問題点

a) 安全管理の問題

トンネルの安全確保のための管理基準として、主に内容変位量が用いられているが、変位の大きさでは地山の安定を判断できない。最も有効と考えられる変位速度（収束状況は変位速度の変化そのものを示す）を加えた管理基準を設定すべきである。そのためには、早期の変位が重要であるが、その測定は計測器設置上の問題によって難しくなっている。

b) パターン変更の問題

計測Aの結果に基づいて、本来、作業の管理レベルで速やかに行われるべき支保パターンの変更（地山区分の変更）が、そのルールが確立されていないために、工程の管理レベル（設計変更のレベル）まで引き上げられ、変更手続に長時間を要している。

c) 設計変更（再設計）の問題

設計変更（再設計）に踏み切るための根拠となる判断基準が確立されていない。また、当初の設計や管理基準のチェックのための計測Bが分布の狭い特殊区間で行われ、計測データが有効に利用されていない（将来のための資料の蓄積に留まっている）場合が見受けられる。

d) その他の問題

パーソナル・コンピュータを利用した計測管理システムは、使い勝手が良い反面、OSや言語に汎用性がないため、ハードウェアの変更に伴うソフトウェアのコンバートが大きな問題となっている。

5. おわりに

以上、NATMの計測管理の現状とその問題点を述べたが、現場計測の自動化の面で、NATMは他の土木工事に比べて遅れている。その原因は、内空変位に代表される最も重要でしかもデータ量の多い日常の計測が手動計測に頼らざるを得ないところにある。この意味で、日常計測の自動化が可能な新しい計測器の開発が待たれるところである。

参考文献 1) 日本トンネル技術協会編、「NATMの計測指針に関する調査研究報告書」、昭和58年3月。