

# (61) トンネルにおける計測管理

飛鳥建設 土木技術部 正会員 ○ 近 久 博 志  
正会員 後 藤 辰 夫  
正会員 川 端 康 夫

## 1. はじめに

地盤を対象にして構造物を造り上げる場合、その機構が不明確であるため、実際の管理は施工中の計測管理に委ねられることが多い。とりわけトンネルでは、設計を事前設計と呼び、計測による設計の変更を前提として考えている。ここでは、こうしたトンネルの特殊性を考慮した計測管理手法について説明し、管理基準値のあり方について考察する。

## 2. 計測管理

トンネル施工において、切羽掘進の段階で支保材の増減の判断をしなければならないため、管理には手軽で即時性のある将来予測のできる手法が組み込まれている必要が生じる。また、地質と施工が絡み合った具現が計測値であるため、計測管理にも当然のことながら両者を考慮する必要が生じる。

こうした背景から図-1のような計測管理を考える。トンネルの進行に伴って順次計測A（内空変位、天端沈下）の最大値や最大速度等に影響を及ぼす要因を分析し、その現場における変位特性について早期に把握するように努める。そして、予測値・計測値・支保の状態に異常が認められれば、その時点でトンネルの安定について検討し、必要ならば対策工を考える。トンネルの安定は分析結果や地山や支保材の目視できる範囲の状況判断からも十分検討できるが、設計的には逆解析の手法が容易に利用できる。また、逆解析の結果を用いれば有限要素法による対策工の検討も可能になる。逆解析の適用性については、計測Aと計測B（地山内変位や支保材の挙動等）が同時に行なわれた計測断面における計測結果に対し検証及び照査を行う。

本手法によると切羽観察の段階で最終のトンネルの状態（内空変位、天端沈下、支保材の発生応力等）を予測することになり、支保パターンの設定や支保の増減の判断が可能になる。しかし、対策工の有無や支保パターンの変更に拘わらず、計測によるトンネルの安定の監視、確認は当然行なう必要がある。

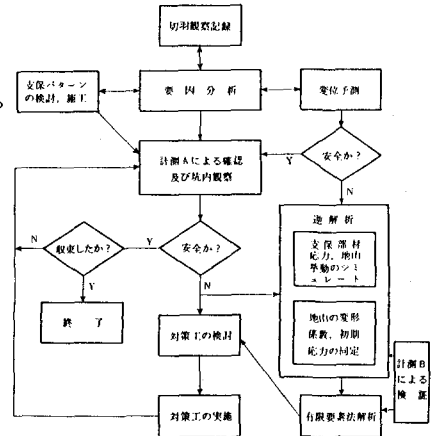


図-1 計測管理フロー

## 3. 要因分析

得られるデータの特徴を考えて、数量化理論第1類による分析を紹介する。計測Aが実施された断面の切羽記録や支保パターンの中からいくつかの要因を選び、計測Aの値を外的規準として分析すれば、次の切羽の段階で、その断面の計測Aの値が回帰係数の単純和から求められることになる。例えばMトンネルのデータから表-1のように5つの要因を考えて、内空変位と天端沈下の最大値を外的規準にして分析する。（表-2、表-3）どちらも0.9以上の重相関係数が得られ、高い相関にあることが分る。

また、分析結果から「土被りが浅くなるほど内空変位が多くなる。

その割に天端沈下はその傾向がない。」等を現場の施工担当者が検討し、計測Aに影響する要因を把握していく。次にこれらと同じ条件にあるとして、次の切羽のデータから計測値（計測A）の予測をする。

表-1 カテゴリー表

| レベル      | I                                             | II                                     | III                                     |
|----------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 要因       |                                               |                                        |                                         |
| A 切羽の状態  | ①安定                                           | ②鏡面から岩塊が抜け落ちる                          | ③鏡面の押し出しを生じる                            |
| B 圧縮度    | ① $\sigma_c > 100 \text{ kg/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る | ② $1000 > \sigma_c > 200$ ハンマー打撃でくだける  | ③ $200 > \sigma_c > 50$ 軽い打撃でくだける       |
| C 割れ目の頻度 | ② 間隔 $d < 1 \text{ m}$                        | ① $1 \text{ m} > d \geq 20 \text{ cm}$ | ③ $20 \text{ cm} > d \geq 5 \text{ cm}$ |
| D 土被り    | 50 m 以上                                       | 20 m ~ 50 m                            | 20 m 以下                                 |
| E 支保パターン | I<br>A                                        | II<br>B                                | III<br>C <sub>I</sub>                   |
|          |                                               | IV<br>D <sub>II</sub>                  | V<br>D <sub>I-I</sub>                   |

一例として、表-2 (計測断面1~24) の分析結果から計測断面25~29までの内空変位を予測した結果と実測値の比較を図-2に示す。例えば、データの分散を考えて2σの範囲を予測域とすると (計算値±0.9) が予測値となる。現場において計測値がこの予測値から大きく掛け離れるようなことがあれば、坑内の状態や計測値の進行状態に異常がないか調べる。この場合、施工中の異常や変化等も大きな要因となり得る。異常がなかったり、安全ならば、そのデータを入れて再度分析を行う。

4. 逆解析

ここで言う逆解析とは手軽に入手できる計測Aの結果から地山の挙動や支保材の発生応力や地山の等価な物性値や初期応力を得ようとするものである。例えば、前回発表の手法<sup>(1)</sup> (有限要素法の弾性解析に共役勾配法と黄金分割法を応用) によって解析すると図-3のようになる。ここでは未知数を地山の弾性係数と側圧係数としてある。また、両者の収束性が良くなるように  $\{X'\} = \{\partial f / \partial x\}_1, \{X\} / \{X_0\}$  としてある。

上記の要因分析で使用したMトンネルの計測断面25を対象に解析する。

- i) ケース1…計測断面24までの要因分析による計測Aの予測値を入力。
- ii) ケース2…計測Aの実測値を入力。

55節点17要素の左右対称モデルを使用した場合の解析結果と実測値の比較を図-3に示す。ケース2では実用的なオーダーでの一致が窺える。ケース1では、内空変位の予測値が実測値よりも小さいため、ケース1より側圧が小さくなったような解析結果となっている。

表-2 内空変位の回帰係数

| 要因       | I                 | II                 | III                 | 平均回帰係数               | 偏重回帰係数            |
|----------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| A 切羽の状況  | 0<br>(17)         | 1.624<br>(7)       | —                   | 0.743                | 0.742             |
| B 圧縮強度   | 0<br>(12)         | 0.680<br>(11)      | 0.680<br>(1)        | 0.603                | 0.494             |
| C 割れ目の頻度 | 0.353<br>(5)      | 0<br>(17)          | 3.009<br>(2)        | 0.562                | 0.774             |
| D 土盛り    | 0<br>(12)         | 0.846<br>(7)       | 3.001<br>(5)        | 0.812                | 0.863             |
| E 支保ハネン  | I<br>4.032<br>(7) | II<br>3.343<br>(8) | III<br>3.624<br>(5) | IV<br>0.3,000<br>(3) | V<br>0.809<br>(1) |
| ※( )内は精度 |                   |                    |                     |                      |                   |
|          |                   |                    |                     | 定数項                  | 重回帰係数             |
|          |                   |                    |                     | -0.549               | 0.809             |
|          |                   |                    |                     | -3.30                | 0.96              |

表-3 天端沈下の回帰係数

| 要因       | I             | II                   | III                 | 平均回帰係数             | 偏重回帰係数            |
|----------|---------------|----------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| A 切羽の状況  | 0<br>(8)      | 0<br>(5)             | —                   | -0.350             | 0                 |
| B 圧縮強度   | 1.571<br>(6)  | 1.000<br>(6)         | 0<br>(1)            | -0.319             | 0.627             |
| C 割れ目の頻度 | 0<br>(4)      | 0.143<br>(6)         | 1.143<br>(2)        | 0.322              | 0.629             |
| D 土盛り    | 0.286<br>(3)  | 0<br>(5)             | 1.000<br>(4)        | 0.466              | 0.732             |
| E 支保ハネン  | I<br>0<br>(4) | II<br>0.1,429<br>(0) | III<br>0.429<br>(5) | IV<br>1.429<br>(3) | V<br>0.887<br>(1) |
| ※( )内は精度 |               |                      |                     |                    |                   |
|          |               |                      |                     | 定数項                | 重回帰係数             |
|          |               |                      |                     | -1.57              | 0.91              |

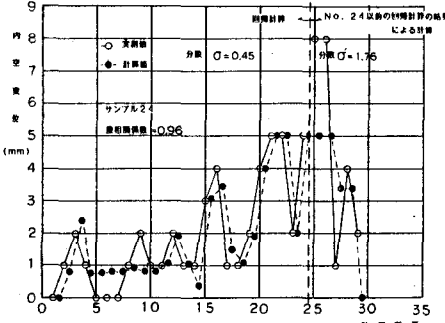


図-2 要因分析結果と予測値

表-4 入出力値

|      |          |                                                                                                             |
|------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 物性値  | 地山       | $\nu = 0.3$<br>$\sigma_{yo} = 5 \text{ kg/cm}^2$<br>$\tau_{xyo} = 0 \text{ kg/cm}^2$<br>$t = 15 \text{ cm}$ |
| 値    | 吹付コンクリート | $E = 100000 \text{ kgf/cm}^2$<br>$t = 15 \text{ cm}$                                                        |
|      | ロックボルト   | $E = 210000 \text{ kgf/cm}^2$<br>$A = 5.07 \text{ cm}^2$                                                    |
| 計測値  | 天端沈下     | 0.2 cm                                                                                                      |
| 予測値  | 内空変位     | 0.5 cm (ケース1)<br>0.8 cm (ケース2)                                                                              |
| 解析値  | 地山       | $E_1 = 19062 \text{ kgf/cm}^2$ (ケース1)<br>$E_2 = 15840 \text{ kgf/cm}^2$ (ケース2)                              |
| 側圧係数 |          | $K_1 = 1.723$ (ケース1)<br>$K_2 = 2.465$ (ケース2)                                                                |

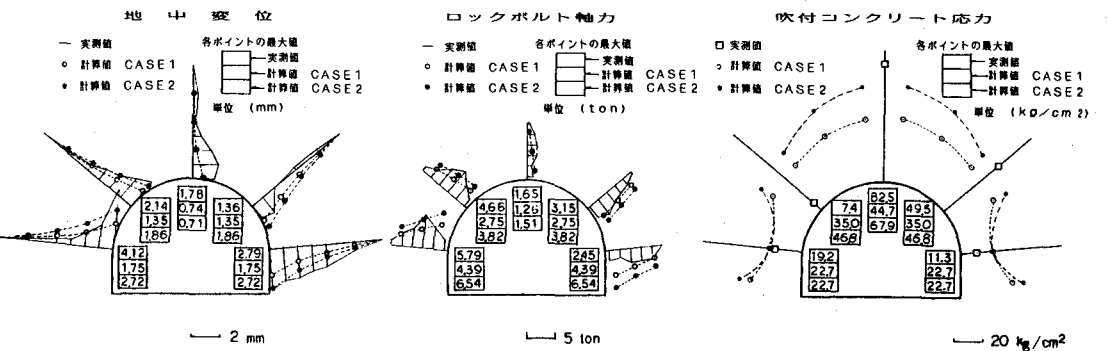


図-3 逆解析結果と計測値の比較

## 5. 管理基準値

計測管理フローの中で重要な管理基準値については、種々研究がなされている。中でも、代表的な桜井の方法は、地山の限界ひずみを定義することにより、基準レベルを設定している。これは有害なゆるみを生じさせないことを目的とした基準であり、手軽に利用でき現場に適した方法である。しかし、ここでは支保材と地山の構造的な安全率から求められる基準値について考えてみる。

トンネルの設計段階では地山の弛みよりも支保材の耐力と変形余裕の検討の方に重きが置かれる。トンネルの崩壊は地山と支保材からなる構造系の安定から考えるものであり、地山や支保材の部分的な破壊だけから考えられるものでもない。

構造的な不安定さを支保材から考えるとき、トンネル内空の変形モードが重要になる。このとき、正確な変形モードも有用であるが、現場管理としては、天端沈下と2～5測線程度の内空変位が良い指標を与えてくれる。まずここでは、1トンネル( $A=79\text{ m}^2$ )をショートベンチカット工法で施工した場合の計測結果を紹介する。(図-4～図-10) 以後内空変位とは上半の水平測線のことをさすものとする。

地中変位とロックボルトの最大軸力は同様の挙動を示し、内空変位とともに単調増加している。インバート閉合後、吹付コンクリートや鋼支保工が剛に抵抗しているため、内空変位に対する増加の伸びが減少している。(図-4、図-5) 鋼支保工軸力と吹付コンクリート軸力は、上半施工時の軸力の伸びはかなりゆるやかである。根足部の地山の耐力が低いと、とりわけ、肩部の軸力の伸びが小さい。しかし、インバート閉合後の軸力は急激な伸びを示している。(図-6、図-7)

ロックボルト軸力は降伏の有無に関係なく、地山とズレを生じながらも内空変位とほとんど線形関係を保ちながら増加していく。これに対し、鋼支保工と吹付コンクリートは、切羽付近では鋼支保工が地山を支持するが、時間の経過に従って吹付コンクリートが負担するようになり、掘削後14日目以降は鋼支保工の軸力の負担率が20%前後の一定値を示すことになる。また、同じ支保パターンで地質が良好になった場合では、図-8と図-9に示したように上半施工時と下半施工後の鋼支保工と吹付コンクリートの軸力の増加はほとんど変化ない。これは、根足部の地山の支持が良好で、鋼支保工や吹付コンクリートは上半施工時も剛に抵抗でき、そのために作用土圧の軽減も少なくなっているためだと考えられる。

次に、このような支保材が破壊された場合の計測例を示す。(図-11) インバート部の二次覆工コンクリートの打設のためインバート部のズリを取り去ったところインバートの中央部で鋼支保工が可縮し、周辺の吹付コンクリートに剝離が生じた。しかし、下半部のロックボルトやトンネルの全体構造としては破壊まで余裕

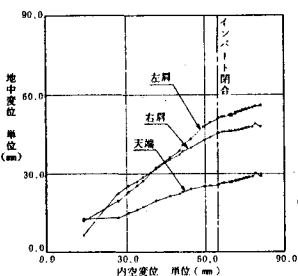


図-4 内空変位と地中変位の相関図

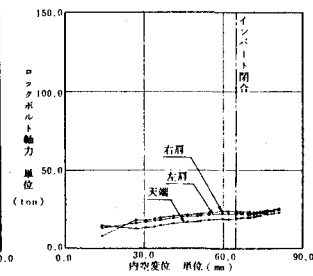


図-5 内空変位とロックボルト軸力の相関図

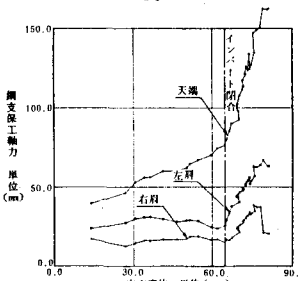


図-6 内空変位と鋼支保工軸力の相関図

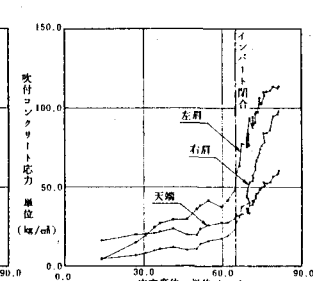


図-7 内空変位と吹付コンクリート軸力の相関図

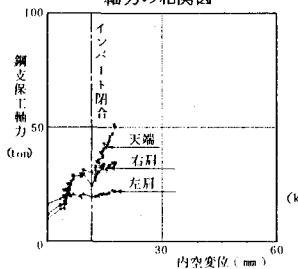


図-8 内空変位と鋼支保工軸力の相関

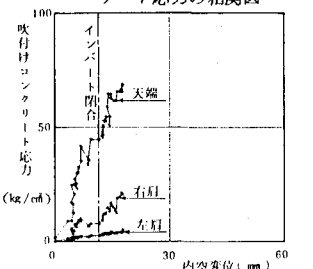


図-9 内空変位と吹付コンクリート軸力の相関

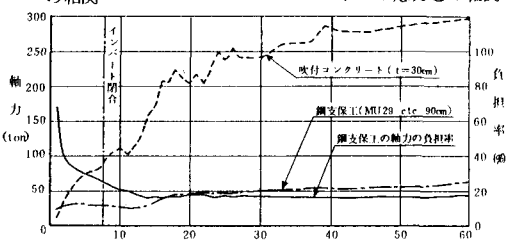


図-10 一間当たりの軸力の負担率の経時変化グラフ 経過日数(11)

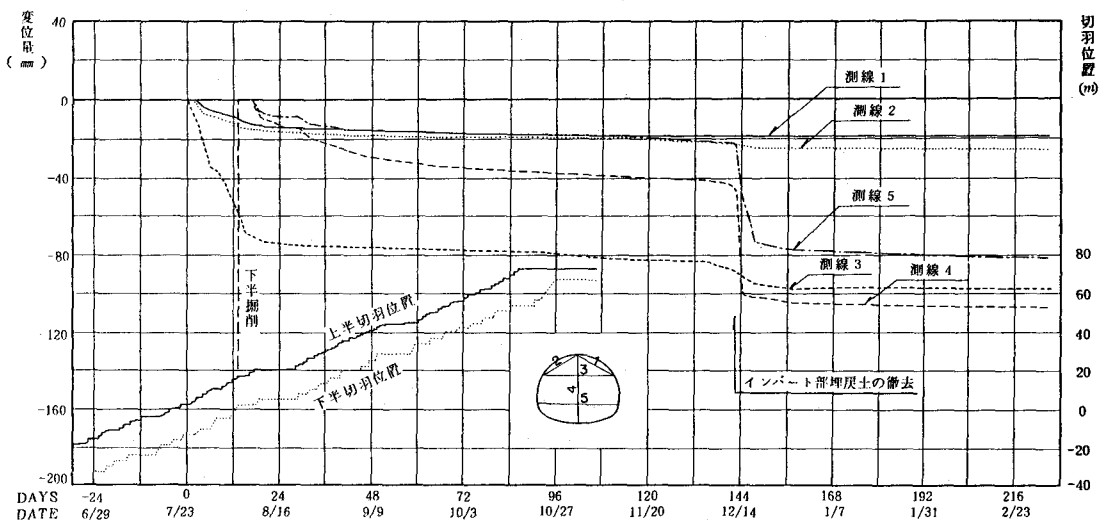


図-11 内空変位の経時変化グラフ

があったため、トンネルの崩壊には至っていない。この時内空変位に急激な変曲点が生じているものの、トンネルの部分的な破壊であることが分る。この内空変位の変曲点をトンネルの破壊と呼ぶかどうかは別の議論であるが、この付近では、支保材の再施工をはじめ、変形余裕量（片側 20 cm）もオーバーし縫い返しも余儀なくされている。

トンネルの安定を考える場合、内空変位の絶対量そのものの値よりも構造系と内空変位のつながりの方が大切な要因となることが分る。そこで支保材の安定を考える場合、変形モードに対する変形能力の限界を考えるべきである。また、トンネル全体の安定を考える場合は、構造的な不安定さの検討となる。

## 6. まとめ

計測を現場にフィードバックできる手法として、前述の計測管理フローは有効であると思われる。しかし、そうした手法そのものよりも、現場の施工担当者が数量化理論第Ⅰ類等の統計的手法を用いて、トンネルの変形挙動を把握しようと努めることに大きな意義があるものと考え。また、逆解析は計測値の設計へのフィードバックだけでなく、部分的な計測データから前述のトンネルの安定を考える場合にも有効な手段となり得る。今後、この方面の研究を進め、管理基準値等の検討を行なっていきたい。

最後に、本論文作成にあたり神戸大学工学部の桜井教授からの御指導に深く感謝の意を表すと共に、関係諸兄にあらためて謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) 入江, 近久, 福井, 山田「神居古潭変成帯における NATM 施工（逆解析への適用）」第 16 回岩盤力学シンポジウム 1984 土木学会
- 2) 桜井, 武内「トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法」土木学会論文報告書 1983. 9
- 3) 福島「トンネル支保の安全率の考え方」第 36 回年次学術講演会講演概要集Ⅲ - 364, 1981. 10

(61) APPROACH TO MEASURING CONTROLS IN TUNNEL CONSTRUCTION

Hiroshi Chikahisa

Tatsuo Gotoh

Yasuo Kawabata

Tobishima Construction Co., Ltd.

Abstract

There are in-situ measurements in tunnel construction classified into two groups called the followings;

- Measurement A ..... for daily construction controls.
- Measurement B ..... for geological interests.

The authors propose the measuring control procedure which combines Measurement A (composed of convergence measurements, geodetic measurement of the roof and face sketchings), statistical technique (quantification theory) and back analysis. The adaptation of this utility procedure is discussed which allows tunnel engineers to analyze and forecast final tunnel behaviors of that cross-section on sketching face conditions. And it is discussed how to estimate control limit of Measurement A (except face sketching data) based on practical measuring results.