

ロックボルトの自動化解析について

(株) 喰谷組 正員○上野正高
同 上 正員 藤木広一

1. はじめに

近年、特に膨張性地山や軟弱地山におけるトンネル支保の一手段として、全面接着型ロックボルト及び吹付けコンクリートが用いられており、その効果が注目されている。これらの支保を用いるトンネル工法は通称NATMと呼ばれているが、その支保機能が十分に発揮されているかどうかの判定基準を得るために、種々の計測方法が考えられている。このようにNATMは計測情報を主体としたトンネル施工法と考えられるが、結論的には地山自体の持つ潜在的支持能力及び特性を最大限に生かし、支保と地山を一体構造式として考えることがNATMであると言える。

すなわちNATMには計測が必要であり、また計測結果をいかにして実施工に生かすかが問題となる。得られた計測情報と実施工を結びつけることが情報化施工の最終的目的である。

2. 古典的NATMの原理

NATMの創始者であるRabcewicz教授は、NATMの原理を次のように述べている。

「特に不安定な岩盤におけるトンネル施工法では、地山自体の支持能力を最大限に利用することが重要である。このためには地山を注意深く観察し、応力の再配分が円滑に行なえるように支保を選定して用いる。この目的を達成する手段として、フレキシブルな鋼性支保、システムチックなロックボルト、吹付けコンクリートを用い、これらによって閉じたシェルを形成させる。応力の再配分がうまく行なわれているかどうかについては計測結果で確かめなければならない。次に二次覆工については、外部アーチが釣り合いに達する前に施工してはいけない。これは二次覆工コンクリートの安全率の増加が必要であるからである。」

概念的説明はこれで十分であると思われるが、実際の適用問題として、地山自体の支保能力の機能とはどのようなものか、地山を注意深く観察する方法、地山の応力の再配分とはどういうことか、何故フレキシブルな支保、ロックボルト、吹付けコンクリートが必要か、二次覆工の最適な施工時期は本当に見い出せるのかについて具体的な説明を必要とする。Rabcewicz教授はこれ等の問題について詳細に述べているが、現在行なわれているNATMはこれ等の問題に対して岩盤力学的理論とトンネル施工法を結びつけて考えることが中心で古典的NATMとはずいぶん異質な方向に発達し、現在のNATMは当初考えられたNATMとは本質的に異なるものと考える人が多くいるに到っている。

3. NATMと計測

NATMにおける計測の目的として次のようなものが考えられる。

1) 日常の管理のための計測

地山が安定したかどうかの確認、支保工が設計どおりの機能を有しているかどうかの確認、実際の地山の挙動と設計段階におけるその予想との比較検討を行なうことにより、日常の安全管理、材料管理、施工管理を行なう。

2) 将来の設計のための計測

NATMが他工法に比べてまだ経験の浅い工法であり、支保部材の効果、地山物性値と地山挙動との関連性等の不明確な部分が多いために、計測結果を蓄積してさらに今後計画されるこの種の工事の資料とする。

3) 設計・施工へのフィードバックのための計測

計測より地山挙動の時間的変化、地山の応力状態を判断し、支保の増減時期、二次覆工の施工時期を決める。

以上のような計測の目的に対して、実際の計測状況は現場へのフィードバックが非常に困難な状態にある。この最大の原因は計測結果の判断基準が不明確であることと、さらに計測そのものの本質を良く理解していないことにあられると思われる。

計測の実施前に、1) 何を知るために、2) 計測器をどのように配置し、3) どのような整理をし、4) どのように判断するのか等を明確にして計画をたてる必要がある。これ等に対する考え方が明確にされれば計測情報を生かした施工工法がより活発化し、有益な方向に向かうものと思われる。

4. ロックボルトの挙動解析

1) ロックボルトの引抜試験

ロックボルトの引抜試験は、ロックボルトの適用性を知るために最も基本的かつ簡便な方法である。ロックボルトの頂部にセンターホール型ジャッキとダイヤルゲージを取り付け、荷重-変位曲線を描くことにより、ロックボルトの引抜抵抗の特性を知ることができる。Fig-1に、実際に実施された荷重-変位曲線の一例を示す。

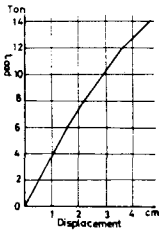


Fig-1 荷重-変位曲線

ここでは、一つの試みとして、ロックボルト ($\ell=3m$) に溝を切り、Fig-2 に示すように、ひずみゲージを貼付し、引抜試験時のロックボルトのひずみ(軸力)の分布状況を測定した。Fig-3(a)に示すものが、引抜試験時の各載荷荷重に対するロックボルトのひずみの分布状態である。引抜強度を増加させるにしたがって、荷重-変位曲線が変化することがわかる。この試験結果の場合、ボルト頂部付近は、ひずみの分布が一定となり、変化していない。この直線圧間は、地山が完全にゆるむか、接着が完全でないため地山との抵抗がえられていない部分であると考えられる。

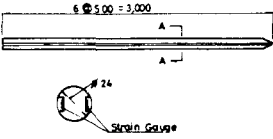


Fig-2 Strain Gauge 付ロックボルト

ロックボルトの微小区間をとり出し、力のつり合いを考えると(1)式がえられる。

$$\sigma \cdot \frac{\pi d^2}{4} \leftarrow \boxed{\tau \cdot d\pi \cdot dx} \rightarrow (\sigma + d\sigma) \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

dx d : ロックボルトの直径

ロックボルトの微小圧間

$$\sigma \cdot \frac{\pi d^2}{4} + \tau \cdot d\pi \cdot dx - (\sigma + d\sigma) \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

(1)式より、せん断応力 τ を求めると、(2)式がえられる。

$$\tau = \frac{d\sigma}{dx} \cdot \frac{d}{4} \dots\dots\dots(2)$$

(2)式において、フックの法則 $d\sigma/dx = E \cdot d\varepsilon/dx$ なる関係を代入すると、

$$\tau = \frac{d\varepsilon}{dx} \cdot \frac{d}{4} \cdot E \dots\dots\dots(3)$$

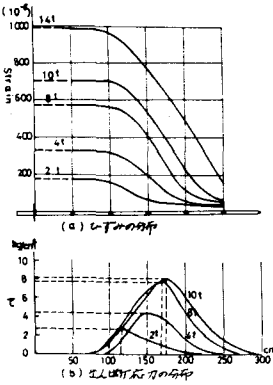


Fig-3 引抜試験時の挙動

がえられる。(3)式によれば、せん断応力では、ひずみの勾配と比例関係にあることがわかる。このボルトの付着状態をより明確に調べるためには、軸力を微分してせん断力分布を求めることにより、明らかである。それが、Fig-4である。図より、せん断力のピークを境にして、軸力分布曲線の形状が変化していることが分る。すなわち、せん断力がピーク値に達するまでの区間は、非抵抗領域であり、ピーク値からボルトの先端までが、抵抗領域である。これをより詳細に区分すると、区間Aがボルトと地山が完全にスリップしている領域であり、無抵抗領域、区間Bが、ボルトと地山の間にスリップはあるが、抵抗力もあり抵抗領域、そして、区間Cは、完全にボルトと地山が密着している完全抵抗領域である。そして、施工上、ボルトが、この抵抗領域に半分以上入っていることが、望ましい。この様に、引抜試験を行うことによって、ロックボルトの長さが適当か否か、又、地山の施工直後の塑性及び非塑性領域の推定が可能となる。

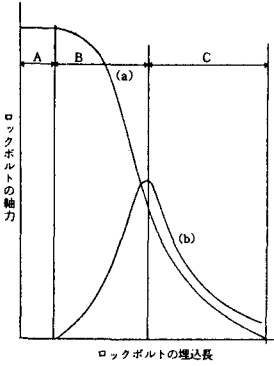


Fig-4 抵抗領域

2) メカニカルアンカーの軸力分布測定

引抜試験後、荷重を除荷し、メカニカルアンカーとして軸力の経時変化を測定すると、Fig-5の様な、トンネル周辺に設置されたロックボルトの軸力分布が得られる。この軸力分布の一部を取り出し、微分及び積分を行うことにより、地山の变形に伴う、ボルトのせん断力及び変形を求めることができる。Fig-6がその結果である。せん断力において、(-)の領域は、地山が内空側へ変形しようとするのをボルトが拘束している状態であり、ゆるみ領域と考えられるのに対して、(+)の領域は、地山の变形に伴ってボルトが抜けようとするのを、地山が拘束している支保領域と考えられる。又、ボルトの变形より、ボルトと地山が完全に密着していると仮定すれば、地山の变形も推定可能である。又、引抜試験のせん断力分布と、この軸力分布が相似形にあることから、引抜試験と、地山の变形に伴うボルトの挙動との間に、何んらかの相関関係がある様に思えるが、この解明は、今後の課題である。この様に、メカニカルアンカーの軸力を測定することによって、施工進行後のゆるみ領域の推定が可能となり、かつ、ゆるみ領域の推定からボルトの長さの適否も判断可能となる。

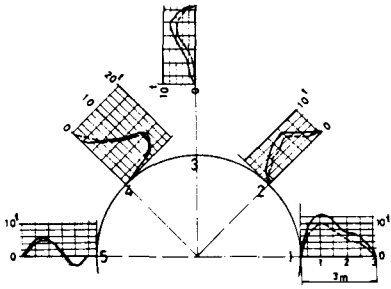


Fig-5 軸力分布

3) ロックボルトの引抜試験による地山物性値の推定

ロックボルトの引抜試験に対するモデル化としてFig-7に示すような骨組解析を行うものとした。実際のロックボルトは全面接着型を想定しているが、ロックボルトと地山との接着状態を部材どうしの結合ということで考察している。この場合の全面接着のモデル化はロックボルトの接合部材の部材を大きくすることによりあるいは、接合部材を多く用いることによって近似されることになる。このような考えでロックボルトと接合部材で結合された状態の接着力の効果は接合部材の太さ、長さ、弾性係数の関数となり結果的には部材のせん断力が接着力に近似されることになる。

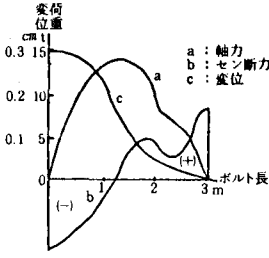


Fig-6 ボルトの変位、軸力、せん断力図

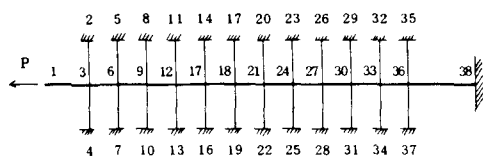


Fig-7 ロックボルト引抜試験のモデル図

4) モデル解析の方法

Fig-7で示されるロックボルトの引抜試験で地山の物性値が一様な場合には、Fig-8(b)で示されるような引抜抵抗力の分布曲線が得られ、弾性論で良くたしかめられる傾向にある。実際に得られる引抜試験結果ではFig-8(a)に示すような軸力分布が得られる。この原因はトンネル壁面に近い部分は、スリップ半固着、完全固着の順になってゆく様子が想像される。考え方として、Fig-7に示されるモデルでFig-8(a)の曲線が得られるような部材の材質を変えて、再現することができれば地山の材質状態をある程度推定可能と考える。

Fig-9は、地山が一様な物性値であることを想定した場合のロックボルトの引抜試験のモデル解析結果として得られたロックボルトの軸力分布とせん断力分布図である。せん断力は地山内部に行くにしたがって小さなものになっているが実際はトンネル壁面に近づくにしたがって掘削の影響を受けているために地山は強度劣化しているのでトンネル壁面に近づくにしたがい大きなせん断力が得られないので、結果的にFig-8の(a)の軸力分布になるものと考えられる。Fig-10は実際に得られたロックボルトの引抜試験結果の軸力分布 (Fig-8の(a)型)に近似的にFig-9から地山物性値を変化させることにより変換した結果である。Fig-10の(a)は軸力分布、(b)は軸力分布を微分して得られるせん断力分布、(c)は計算モデルの部材のせん断力分布を示している。Table-1は計算モデルを実際の引抜試験結果の軸力分布曲線に近似再現した結果の結合部材の弾性係数である。この再現結果から推定されることは地山内の物性値がトンネル壁面に近づくにしたがって明らかに材料劣化していることがわかる。

地山要素	弾性係数	地山要素	弾性係数
2-3 3-4	10	20-21 21-22	9.5×10
5-6 6-7	3×10	23-24 24-25	1×10
8-9 9-10	1×10	26-27 27-28	1.5×10
11-12 12-13	3×10	29-30 30-31	2.5×10
14-15 15-16	8×10	32-33 33-34	2.5×10
17-18 18-19	9×10	35-36 36-37	2.5×10

Table-1 [t/m^2]

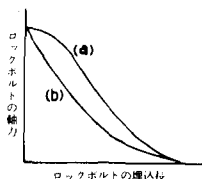


Fig-8 ロックボルトの引抜試験結果

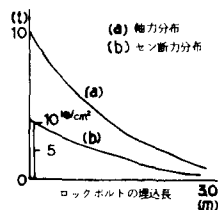


Fig-9 $E = \text{一定}$ の場合

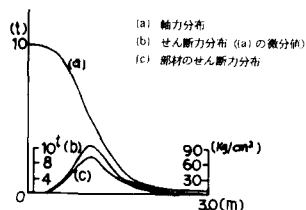


Fig-10 ロックボルト引抜試験の再現結果

5. 計測情報の処理

計測情報処理の目的は、測定した当事者あるいは情報を処理した者だけが理解できても達せられない。あくまでも単純明確に第3者にも説明なしで理解できるものが当然望ましい。

このことを理解するためには、計測がどのような事を知るために設置されているのか、あるいはその目的を容易に理解するためにはどのような処理が必要かを考える必要がある。第3者を交えて議論や討論する場合に、計測技術や処理方法の技術を詳細に説明するのは本来の目的ではなくて、処理された結果をできるだけ単純明確に理解してもらい、フィードバックの方法を容易にすることが目的である。このためには、計測結果を単なる数字のら列にしていれば第3者にとっては非常に難解で理解しにくいので、単純な図・表化が必要となる。ただし計測データが多くなればなるほど単純化作業としての図・表化作業に多大な労力を要するが、これは本来の目的ではなくてその後の判断にある。いずれにせよ、正確に、速く、見やすい図・表化を効率よく行なうことが計測情報の処理を行なうのに必要である。

計測情報処理の一例としてロックボルトの自動解析法について述べる。

ロックボルトの試験方法としては引抜試験とメカニカルアンカーとしての測定方法がある。

これ等の解析方法をできるだけ自動的に行う必要がある。この結果により計測結果をより迅速にしかも正確に施工に反映することが可能である。

計測結果を自動解析するには次の条件を満足させる必要がある。

- 1) 測定値を滑らかな曲線で結合する。
- 2) 曲線は連続関数で任意点で容易に微積分が可能である。
- 3) 測点と測点の間にできるだけ変曲点が生じない。

以上の条件を満足し測定値を滑らかに結んだ曲線をできるだけ正確に近似関数で表現することができれば、ロックボルトの試験結果の自動解析が可能になる。

最小自乗法による高次多項式

測定結果を最小自乗法によって高次多項式に近似させる。

説明を簡単にするため方法として二次の場合とする。

$$y = a + \ell x + cx^2 \dots\dots\dots (4)$$

まず実測値 y と推定値 y との差を求め、これを平方して合計したもの S を計算する。

S には未定常数 a 、 ℓ 、 c が含まれる。 S を最小にするために S をそれぞれ偏微分する。

$$\partial S / \partial a = 0, \quad \partial S / \partial \ell = 0, \quad \partial S / \partial c = 0 \dots\dots\dots (5)$$

一般に n 対の測定値 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 $\dots$ (x_n, y_n) について S は

$$S = \sum_{j=1}^n (y_j - a - \ell x_j - cx_j^2)^2 \dots\dots\dots (6)$$

(6)式を略して(7)とする。

$$S = \dot{S} (y - a - \ell x - cx^2)^2 \dots\dots\dots (7)$$

正規方程式は

$$\left. \begin{aligned} -2 \cdot \dot{S} (y - a - \ell x - cx^2) &= 0 \\ -2 \cdot \dot{S} [x (y - a - \ell x - cx^2)] &= 0 \\ -2 \cdot \dot{S} [x^2 (y - a - \ell x - cx^2)] &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

両辺を2で割って、方程式の係数を括弧の外にだして書く。

$$\left. \begin{aligned} -\dot{S}(y) + a\dot{S}(1) + b\dot{S}(x) + c\dot{S}(x^2) &= 0 \\ -\dot{S}(xy) + a\dot{S}(x) + b\dot{S}(x^2) + c\dot{S}(x^3) &= 0 \\ -\dot{S}(x^2y) + a\dot{S}(x^2) + b\dot{S}(x^3) + c\dot{S}(x^4) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

(9)式を解くことにより常数 a 、 b 、 c を求めることが可能である。

測定値が多く、高次の場合にはコンピュータの適用が望ましい。

6. 処理例

計測データの解析に関しては種々の試みを行なった。計測データを平滑化して連続な曲線を得ると、これを微分することによりロックボルト軸力の軸方向変化曲線 (Fig-11) からロックボルトと地山の間の付着力の軸方向変化図 (Fig-12) を得ることができる。

ここでは最小二乗法を用いた多項式による曲線回帰により、データの平滑化を行なっている。一般に知られているように、多項式の次数を高くすると回帰曲線が激しく振動する場合があります、低次 (3~5 次) が適当であると思われる。

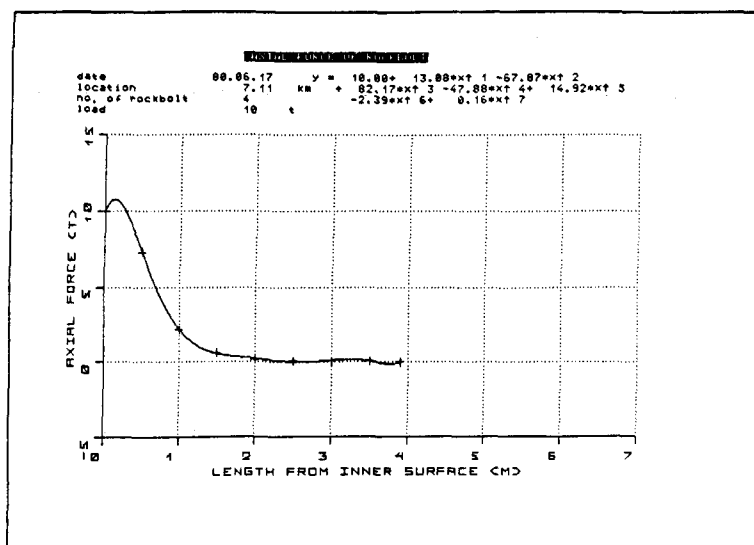


Fig-11 ロックボルト軸力の軸方向変化図

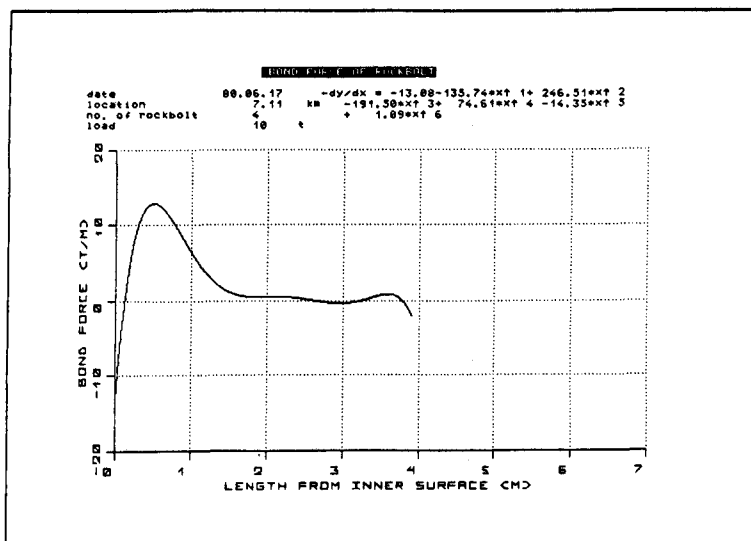


Fig - 1 2 付着力の軸方向変化図

7. 今後の課題

- 1) 安全性に関する管理規準の考え方を整理すること。
- 2) データの平滑化に関し、さらに安定した曲線を得ること。