

(20) 計測結果に基づく覆工の支保機能に関する一考察

応用地質株式会社 正会員 ○進士 正人
正会員 満 弘之
正会員 三上 元弘

A Study of Input Parameters of Linings for Two-dimensional Numerical Analysis by using Field Measurements

Masato SHINJI, Hiroaki MITSU and Motohiro MIKAMI, OYO corporation

summary

Many finite element method programs have been developed by a lot of researchers. However, it is difficult to estimate appropriate input parameters concerning the steel ribs and shotcrete linings, because of the complex behavior of the shotcrete and the interaction between linings and a ground.

In order to estimate sensible input parameters, the field measurements on the stresses of steel ribs and shotcrete linings we are carried out. From the result of field measurements, the authors propose that shotcrete linings takes partial charge of loads in a first stage of tunnel excavation, and the ratio of the modulus of elasticity of shotcrete linings to the steel ribs will converge a constant value.

1. まえがき

特殊なトンネルの設計や大規模地下空洞の設計を行なう場合、支保の適正な規模を決定するためには、有限要素法等の数値解析的な手法を用いて事前に掘削時の地山挙動を予測し、その結果を用いて設計を実施する場合が多い。この時の数値解析では、近年のコンピューターの急激な進歩にも関わらず現在のところ2次元解析が一般的であると思われる。この場合、ロックボルトや吹き付けコンクリート覆工並びに鋼製支保工の支保効果を何らかの方法を用いて2次元解析に取り入れなければ、精度の良い数値解析を実施したことにはならず、その結果、信頼性の高い設計を実施することが難しくなるように思われる。

ロックボルトの2次元解析への取り込み方法についてはこれまでいくつかの方法が提案されている^{1), 2)}が、吹き付けコンクリート覆工並びに鋼製支保工についてはその取り扱いに関する明確な考え方が示されていないのが現状と思われる。

そこで、筆者らは、過去に公表されたトンネル計測データおよび筆者らが実施した業務によって得た計測データに基づき支保パターンの妥当性の評価を収集・整理し、2次元数値解析に関する吹き付けコンクリート覆工並びに鋼製支保工の評価方法について検討をおこなった。

本文では、まずその基本的な考え方を述べ、次に検討結果の一部について紹介を行なう。

2. 2次元解析への覆工の剛性の取り入れ方に関する基本的な考え方

覆工の剛性を検討するために、ここでは、単位当たり（支保工ピッチ当たり）の覆工に作用する平均的な覆工応力を考える。単位当たりの覆工に作用する荷重 P は、吹き付けコンクリートによって分担される荷重 P_s と鋼製支保工によって分担される荷重 P_p の和として、すなわち、次式のように表させると仮定する。

$$P = P_s + P_p \quad (1)$$

吹き付けコンクリート及び鋼製支保工の荷重は、それぞれの弾性係数、ひずみ等によって以下のように表される。

$$P_s = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s \quad (2)$$

$$P_c = A_c \cdot E_c \cdot \epsilon_c \quad (3)$$

ここで、 A_s, A_c : 鋼製支保工、吹き付けコンクリート覆工の断面積
 E_s, E_c : 鋼製支保工、吹き付けコンクリート覆工の弾性係数
 ϵ_s, ϵ_c : 鋼製支保工、吹き付けコンクリート覆工に生じるひずみ

(2)、(3)式を用いて、(1)式を書き直すと以下ようになる。

$$P = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s + A_c \cdot E_c \cdot \epsilon_c \quad (4)$$

ここで、鋼製支保工と吹き付けコンクリート覆工は、一体となって変形する。すなわち、変形によって生じるひずみは以下の式で表され则认为る。

$$\epsilon_s = \epsilon_c = \epsilon \quad (5)$$

次に、鋼製支保工の断面積が吹き付けコンクリート覆工の断面積に比較して非常に小さいと考えれば、吹き付けコンクリート覆工の断面積は、全体の断面積 A にほぼ等しいと考えられるので、

$$A_s \ll A_c \quad A_c \approx A \quad (6)$$

これを用いて(1)式を書き直すと以下ようになる。

$$P = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon + A_c \cdot E_c \cdot \epsilon \quad (7)$$

覆工の平均的な荷重は、(2)、(3)式と同様に表現できるから、(1)式は、以下ようになる。

$$A \cdot E \cdot \epsilon = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon + A_c \cdot E_c \cdot \epsilon \quad (8)$$

従って、覆工を等価な連続体と考えたときの等価弾性係数 E は、

$$\therefore E = \frac{A_s}{A} \cdot E_s + E_c \quad (9)$$

検討にあたって、「剛性比 R 」を以下のように定義する。

$$R = E_c / \left(\frac{A_s}{A} \cdot E_s \right) \quad (10)$$

また、 E_s^* を、「鋼製支保工の等価弾性係数」と呼び以下の量として定義する。

$$E_s^* = \frac{A_s}{A} \cdot E_s \quad (11)$$

この式の中で、鋼製支保工のサイズ及び支保工のピッチ及び吹き付けコンクリート覆工の厚さは設計時において決めることができるため、 A_s 、 A 、 E_s は既知量となる。従って、 E_s^* は一意に決定される量である。 E_c を一意に決めることができれば解析で用いる等価弾性係数 E を決定することができる。しかし、吹き付けコンクリートの弾性係数は、 E_c は時間によって変化するため、一様に決定することが難しいと考えられている。そこで、まず1時間毎の

覆工応力度の計測結果を用いて吹き付けコンクリートの弾性係数がどの程度であるかを検討する。

次に、計測結果から剛性比を検討するための手順について簡単に述べる。覆工に関する現場計測では、鋼製支保工では軸力 P_0 また、吹き付けコンクリート覆工では応力 $\alpha_c(=E_c \cdot \epsilon_c)$ が計測されることが一般的である。そこで、まず、この鋼製支保工応力から鋼製支保工に生じるひずみ ϵ_s を求めた。当然ながら、この時に用いた鋼製支保工の弾性係数 E_s は通常の鋼の弾性係数である $E_s=2,100,000\text{kgf/cm}^2$ を用いた。

(5) 式の仮定より、鋼製支保工に生じるひずみ ϵ_s と吹き付けコンクリート覆工に生じるひずみ ϵ_c が等しいと考えると、等価吹き付けコンクリート覆工の弾性係数 E'_c は、以下のようになる。

$$E'_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon} \tag{12}$$

従って、 E'_c と E_s から剛性比 R を求めることが可能となり、これらの覆工の弾性係数から2次元解析に用いる弾性係数を(10)式から決定できる。

3. 計測事例に基づく検討

3. 1 吹き付けコンクリート覆工の等価弾性係数の経時変化

吹き付けコンクリート覆工の等価弾性係数の経時変化について著者らの計測事例を紹介する。著者らが測定したトンネルは、いわゆるグリーンタフ地域に分布する新第三紀の凝灰岩中に建設される2車線道路トンネルであり。地質調査の結果では、両トンネルの凝灰岩類を構成する細粒分の多くは、Na型のモンモリロナイトからなり、極度のスレーキング性と膨潤性を有する。これらのことを考慮して、施工時には、この凝灰岩の部分は特殊パターン（Eパターン）で施工されている。図-1、2にその結果を示す。図-1は、計測機器設置直後から、自動計測によって一時間毎に測定を行なったもののうち、48時間までの測定結果である。また、図-2は、その自動計測結果を24時間毎に平均したものである。図-1から明らかなように、測定開始から7時間経過した時点で等価剛性係数は、ピークを示し、その後急激に低下し、一定値に落ち着く。現場では、ピークを示す直前に発破がかかったことを考えると、発破によって新たな地山内の応力再配分が生じ、その荷重は、まず吹き付けコンクリートに作用し、その後、鋼製支保工が地山と密着すると共に荷重が徐々に分散されていく過程を示すことがわかった。また、図-2から明らかなように、24時間以降は概ね一定と考えてよいことがわかる。すなわち、このトンネルの計測結果では、吹き付けコンクリート覆工の時間

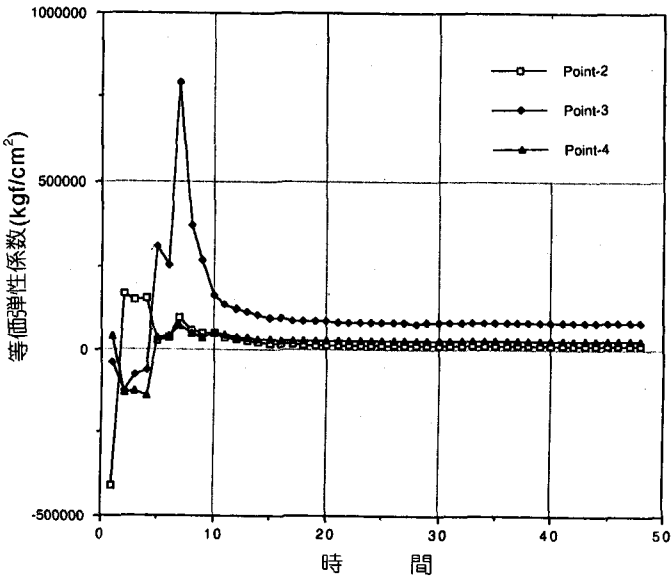


図-1 吹き付けコンクリート覆工の等価弾性係数の経時変化

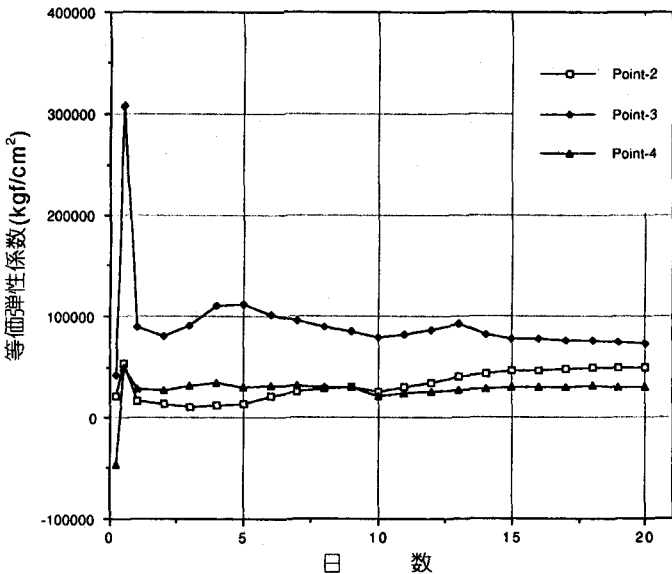


図-2 吹き付けコンクリート覆工の等価弾性係数の経日変化

依存性の挙動は、影響が小さいことが明らかとなった。

3. 2 種々のトンネルの覆工の等価剛性

3. 1の検討結果より、覆工の時間依存性の挙動は、影響が小さいことが明らかとなったため、これからは最終状態の計測データを基に鋼製支保工と吹き付けコンクリート覆工の応力分担率の検討を行なった。計測事例としては、「トンネルと地下」に報告されている計測事例のなかで、それぞれの計測データが掲載されている4例と著者らが独自に測定した2例の計測結果を用いた。検討に用いた計測結果の鋼製支保工軸力から鋼製支保工の断面積で除した鋼製支保工応力と覆工応力との関係を図-3に示す。この図から明らかなように各トンネル毎に異なった勾配を示すものの、全体的には各トンネル毎に良い直線性を示すことが明かとなった。

図-4、5に、鋼製支保工の等価弾性係数の違いすなわち、鋼製支保工のサイズ、ピッチ並びに吹き付けコンクリート覆工厚の違いによる、剛性比の分布並びに吹き付けコンクリート覆工の等価弾性係数の分布を示す。これらの図から明らかなように、鋼製支保工の等価弾性係数 E_s が大きくなるに従って、剛性比 R 及び吹き付けコンクリート覆工の等価弾性係数 E_c は概ね

低下する傾向を示す。また、剛性比 R は、ほぼ1から7の間に分布し、図-5に示す吹き付けコンクリート覆工の等価弾性係数 E_c は見掛け上25,000から450,000 kgf/cm^2 の範囲に分布することが明かとなった。特に、H-200及び吹き付けコンクリート厚が20cmの場合、一般的に考えられている吹き付けコンクリートの弾性係数より大きめの値を示す。すなわち、これまで吹き付けコンクリートは、若材令で応力を受けるため弾性変形以外にも相当量のクリープ変形、乾燥収縮変形を示すため2次元解析に用いる弾性係数は、低めに採用することが一般的であるが、実際には、時間依存性の挙動もあまり認められず、ほぼ吹き付けコンクリートの平均的な弾性係数の半分程度を示すことが明かとなった。しかし、設計時において2次元解析を行なう場合、鋼製支保工の弾性係数は、等価弾性係数に換算して解析に用うことはもちろんであるが、吹き付けコンクリートの弾性係数は、支保の規模によって

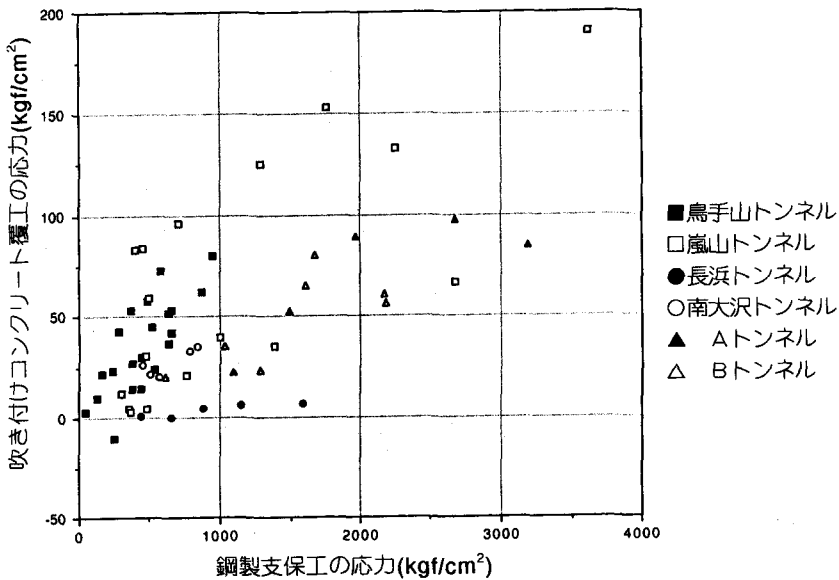


図-3 種々のトンネルの鋼製支保工と吹き付けコンクリート覆工の応力の分布

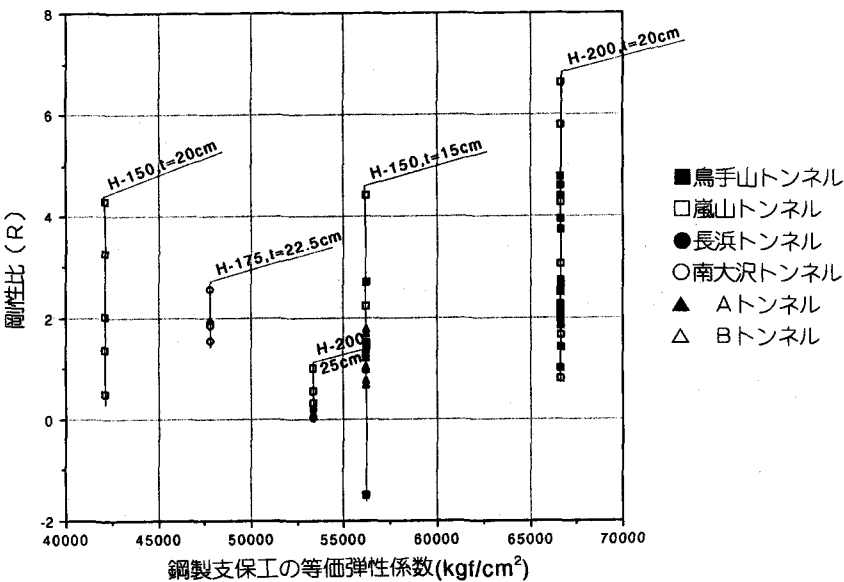


図-4 鋼製支保工の等価弾性係数違いによる剛性比(R)の分布

決定するが、安全側を考え下限値付近を採用するべきであると思われる。

5. まとめ

本文では、2次元解析に用いるための覆工の剛性をどのように入力すればよいかについて、著者らの測定データ並びにこれまでに発表されたデータを基に検討を加えた。

その結果、覆工の時間依存性についてはさほど影響がないことが明らかとなった。また、支保工タイプの違いによって応力分担率が変化することがわかった。

特に、これまで吹付けコンクリートは、若材令で応力を受けるため弾性変形以外にも相当量のクリープ変形、乾燥収縮変形を示すため2次元解析に用いる

弾性係数は、低めに採用することが一般的であるが、先にも述べたように我々の測定データでは、吹付けコンクリート覆工の時間依存性の挙動はあまり認められなかった。

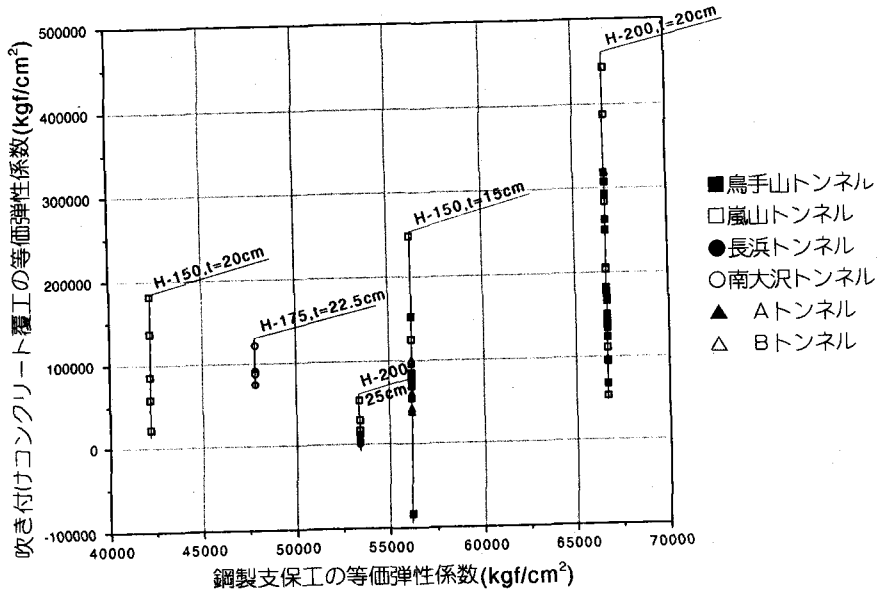


図-5 鋼製支保工の等価弾性係数違いによる吹付けコンクリート覆工の等価弾性係数の分布

参考文献

- 1) 近藤 達敏、土屋 浩「ロックボルトの変位拘束効果を表わすビーム要素モデル」、第17回土質工学研究発表会講演集、pp.685-688、1982。
- 2) 土屋 敬「NATMFEMにおける入力物性値に関する研究」、第16回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.121-125、1984。
- 3) 益田 穎稀、菊池 晋、林 正彦「中壁工法による3車線トンネルの施工」-東名改築の鳥手山トンネル-、トンネルと地下、第18巻第10号、pp.15-19、1987。
- 4) 稲葉 英憲、西谷 直人、手塚 洋、新田 訓弘「神居古潭蛇紋岩地帯にトンネルを掘る」-道央自動車道嵐山トンネル-、トンネルと地下、第19巻第6号、pp.25-36、1988。
- 5) 大井 英臣、山下 久雄、日根 幸雄「50mの破碎帯を計測管理で克服」-国道178号江野トンネル-、トンネルと地下、第20巻第2号、pp.21-26、1989。
- 6) 須田 稔、永関 久信、菅原 綾雄「未固結地盤に偏平大断面トンネルを掘る」-横浜横須賀道路金沢支線長浜トンネル-、トンネルと地下、第20巻第3号、pp.51-59、1989。
- 7) 稲葉 英憲、西谷 直人、手塚 洋、新田 訓弘「神居古潭蛇紋岩地帯にトンネルを掘る(その2)」-道央自動車道嵐山トンネル-、トンネルと地下、第20巻第5号、pp.15-23、1989。
- 8) 松川 安満、塚本 幸雄、小林 正邦、「大断面双設トンネルをCD、NATMで掘る」-多摩ニュータウン幹線 南大沢トンネル(仮称)-、トンネルと地下、第20巻第10号、pp.7-16、1989。