

トンネルにおける吹付けコンクリートの支保効果

Effects of shotcrete in tunneling

久武 勝保*

Masayasu HISATAKE

1. 緒 論

NATMの適用において、吹付けコンクリートは欠かす事の出来ない支保部材である。しかしその支保効果を定量的に評価するのは容易でない。それは、吹付けコンクリートの強度、変形特性が時間と共に変化するためである。

トンネル変位が少ない場合には、吹付けコンクリートは強度を十分発現する事が出来るので、その支保目的を達成しやすいが、膨張性地山でみられるように、変位が多くまたその発生速度が早いトンネルの場合には、吹付けコンクリートの支保能力は十分発揮できなくなる。その理由として、吹付けコンクリートは吹付け直後から強度を徐々に発現しはじめるので、不十分な固結状態のもとで過度の地圧が作用すれば、その後の強度発現がのびなったり、あるいは降伏しやすくなるためである。したがって、鋼製支保工やロックボルトのように、当初から強度を有する支保部材と異なり、吹付けコンクリートはその強度発現の速度とトンネル変位の増加速度等の関係により、支保効果が決定される事になる。

以下では、時間依存性を示す膨張性地山での現場施工例と、その挙動を定量的に評価した解析結果を通して、吹付けコンクリートの支保効果について考察する。また、工事現場において吹付けコンクリートの支保効果を評価・管理する手法についても言及する。

2. 施工・解析条件

吹付けコンクリートの支保効果は、掘進速度や他の支保部材の併用の程度といった種々の施工条件の影響も受ける。当現場の施工・解析条件の一部を下記に示す。

- 1) 吹付けコンクリート：強度と弾性係数の増加の時間依存性、応力-ひずみ関係の弾塑性特性
- 2) 地山：線形粘弾性（対数刻-7°関数）： $\phi(t) = a \cdot b \cdot \ln(1+t)$ a, b : 定数, t : 時間
- 3) 切羽手前の3次元トンネル変位、軸力で地圧に抵抗
- 4) 施工条件：掘進速度(V)、毎分8インチ鋼管支保工の建て込み間隔(L)と弾塑性特性(σ'-ε関数)、応力-ひずみ直線の降伏前後の傾きE₀とE₁、

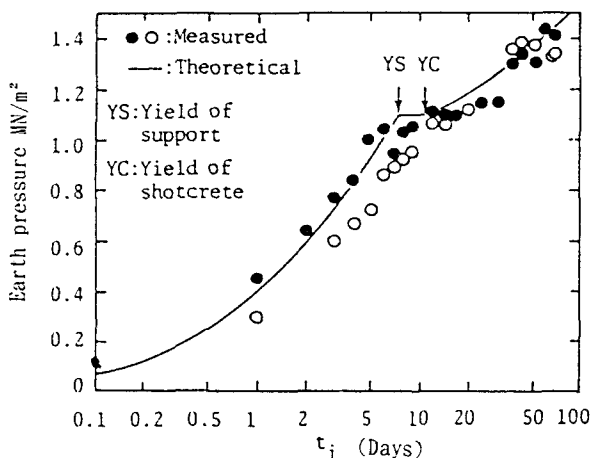


図-1 支保工の実測と解析地圧

* 正会員 近畿大学助教授 理工学部土木工学科

吹付けコンクリートの厚さ及びその施工位置と切羽との間の距離

3. 考 察

現実の支保効果を定量的に評価するには、地山の力学特性を正確に把握する必要がある。そこで、当現場では、予め掘削された直径 3 m の円形試験孔において、深度別半径方向の変位が計測され、その結果を逆解析して地山の力学特性を推定し、それを解析に使用している。

3. 1 併用する他の支保工の役割

図-1 は鋼管支保工（以後、支保工という）に作用した実測地圧と解析地圧を比較して示したものである。図中の Y S と Y C の矢印は、解析から得られた支保工と吹付けコンクリートの降伏時期を示している。実測地圧の急折点と解析より求めた支保工降伏点はよく一致しており、また支保工の降伏後において吹付けコンクリートも降伏している。さらに、吹付けコンクリートが降伏したのち、地圧は再び増加している。この現象を支保工と吹付けコンクリートの軸応力の経時変化から見たのが図-2 である。両者の軸応力は時間と共に増加しているが、支保工はその降伏によって軸応力の増加は一旦ほとんど無くなる。一方、吹付けコンクリートの軸応力は支保工降伏直後から急増しこれにより次には吹付けコンクリートが降伏しているのが理解できる。この様な現象は以下のように説明出来る。

支保工の応力-ひずみ関係は図-3 に示す通りであり、降伏後においてその傾きは当初の 1 % 以下に低下する。したがって支保工が降伏するとその後の地圧増分のほとんどは吹付けコンクリートが負担せざるを得なくなり、その地圧、軸応力は急増し、ついには降伏に至ったわけである。この例から理解できるように、支保工と吹付けコンクリートはそれぞれの剛性に対応して、互いに影響を与えながら地圧に抵抗しているわけである。この場合、先に述べたように、吹付けコンクリートは強度の小さい吹付け初期において過度の地圧を受けると早期に降伏するので、これを防ぐには必要な強度に達するまで、支保工がトンネル変位・地圧に対して十分抵抗する事が必要である。

3. 2 掘進速度のコントロール

図-4 は 2. 中のパラメータのうち、掘進速度 V のみを変化させた場合について、解析より求めた吹付けコンクリートの降伏時軸応力 σ_c^* と降伏時期 T_c^* を示したものである。吹付けコンクリートの降伏時期が支保工

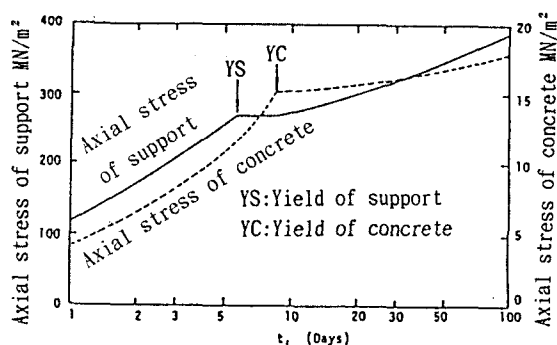


図-2 吹付けコンクリートと支保工の軸応力

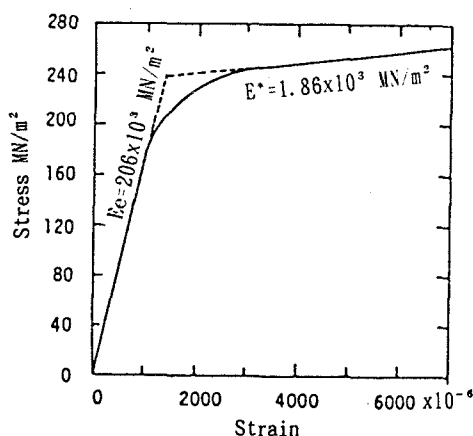


図-3 支保工の応力-ひずみ関係

降伏の前(●)と後(○)で σ_c^* が大きく異なる事が理解できる。●及び○のいずれにおいても、掘進速度が速くなると、トンネルの変位出現が早くなるので、吹付けコンクリートの降伏時期も早くなり、より低い強度で降伏する。支保工よりも吹付けコンクリートが先に降伏する場合(●)には、吹付けコンクリートは強度をほとんど発現せずに降伏するので、大変不経済な支保設計であるといえる。この場合には、掘進速度を遅くしてトンネル変位の出現を遅くする必要がある。

3. 3 支保工建て込み間隔のコントロール

図-4と同様の関係が図-5の支保工建て込み間隔(L)についてもみられる。図-5を参考にすれば、吹付けコンクリートの強度をより活用する支保工建て込み間隔を決める事も可能である。

4. 吹付けコンクリートの評価と管理

吹付けコンクリートの潜在的な支保能力を十分活用するように設計するには、上記のような解析は有効である。しかし、このような設計をするしないに関わらず、吹付けコンクリートや支保工の支保効果を現場で当然確認しながら施工を進める必要がある。

吹付けコンクリートや支保工の経時応力・地圧・ひずみ等をトンネルA計測によるコンパニメント値により逆解析する手法が提案され²⁾、その実証も行われている³⁾ので、それを利用する事もできる。

一方、現場においてはその様な逆解析を行わずに、吹付けコンクリートの支保特性を定性的に評価する

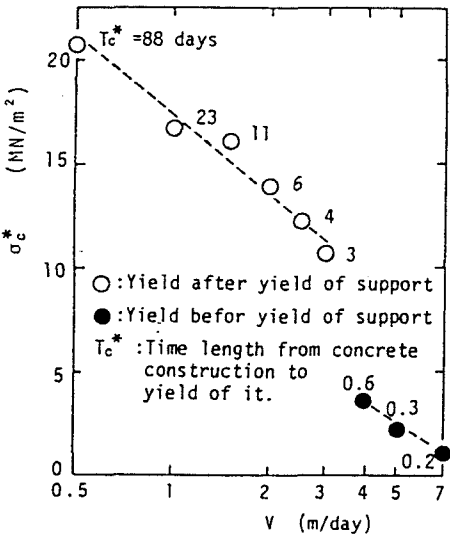


図-4 吹付けコンクリートの降伏時軸応力 σ_c^* と降伏時期 T_c^* に及ぼす掘進速度 v の影響

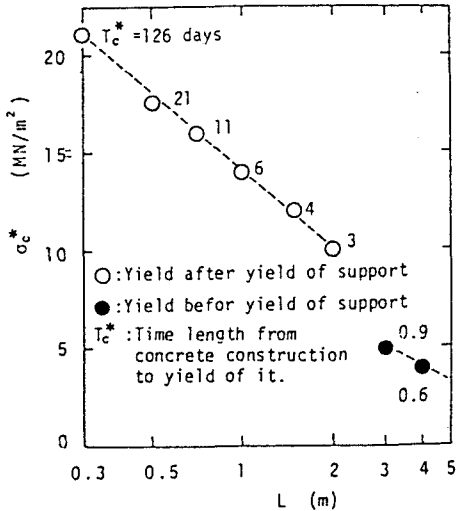


図-5 吹付けコンクリートの降伏時軸応力 σ_c^* と降伏時期 T_c^* に及ぼす支保工間隔 L の影響

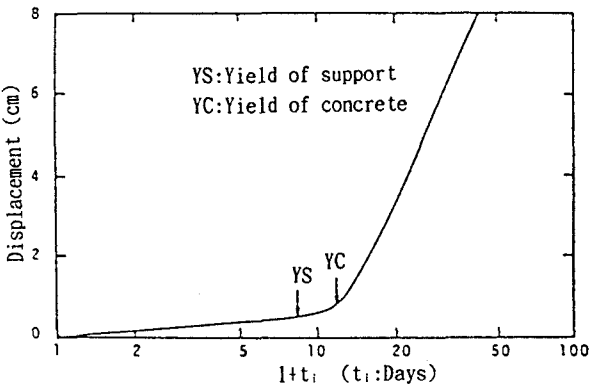


図-6 トンネル変位の経時変化

事も可能である。図－6は当現場でのトンネルの経時変位を示したものである。支保工降伏（YS）後に於いて、若干変位出現が多くなるが、次に吹付けコンクリートの降伏（YC）により、変位は急増しているのがわかる。すなわち、複数の支保部材のいずれもが降伏等の有為なダメージを受けたときに、変位が急増するわけであり、またその時期をA計測変位だけからでも把握する事は可能である。従って、現場の施工条件・地質特性を考慮してあらかじめ作成しておいた図－4、図－5等の様な図を参考にしながら、定性的ではあるが施工条件を変更し、合理的な施工を目指す事も可能である。

5. まとめ

膨張性を示すトンネルでの吹付けコンクリートの支保効果は、その力学特性が経時的に変化するために、他の支保工の力学特性、及び掘進速度等の施工条件に左右される。したがって、これを考慮して合理的な施工を行う必要がある。

参考文献

- 1) 久武・伊藤・桜井：時間依存性を示す膨張性軟岩トンネルの一次覆工挙動、土木学会論文集、第412号／Ⅲ-12、pp. 153-160. 1989.
- 2) 久武・村上：トンネルのA計測変位を用いた覆工応力推定法、土木学会論文集、第457号／Ⅲ-21、pp. 79-86. 1992.
- 3) 久武・村上・土岐・村上：トンネル覆工の簡易安定性評価法とその現場適用、土木学会論文集、第505号／Ⅲ-29、pp. 249-256. 1994.