

道路トンネルにおける覆工省略型トンネルの適用性

日下 敦* 真下英人** 角湯克典***

1. はじめに

トンネル建設のコストを縮減するには、トンネル掘削断面積を低減することや工期の短縮を図ることが有効であり、その一つとして覆工省略型トンネルの採用が考えられる。覆工省略型トンネルは、一次支保の施工後、セントルと呼ばれる型枠を用いた場所打ちによる覆工コンクリート（以下、覆工）を打設せず、完全に覆工を省略するか、必要に応じて吹付けコンクリート（以下、吹付け）や内装パネル等で覆工の機能を代替させる構造で、既に欧州を中心とした海外で実績を持っている。しかし、地山条件が多様な我が国において、不特定多数の人々が利用する道路トンネルに覆工省略型トンネルを適用するためには、解決しておくべき課題も多い。

本稿では、我が国の道路トンネルに対する覆工省略型トンネルの適用性とその耐力について検討した結果を紹介する。

2. 覆工省略型トンネルの適用性

2.1 覆工省略型トンネルの構造

NATMにより建設されるトンネルにおいては、地山が著しく悪い場合等の特殊な条件を除いて、地山の安定性は支保工で確保し、覆工には力学的な機能を期待しないことが前提となる。しかし、予測が困難な不確定要素に対する安全率の確保や、内装としての機能等を考慮して覆工を施工しているのが一般的である。

覆工省略型トンネルにおいては、覆工が有して

いるこれらの機能について、予算的な制約や地山条件、交通条件等を考慮して必要性を判断し、必要なものについては覆工以外の方法により代替することになる。その構造は、対象となるトンネルで要求される機能に応じて様々なものが考えられるが、代表的なものとして図-1に示すタイプのもので挙げられる。

- (1) 完全省略型：従来の覆工を省略し、一次支保のみで施工を完了する。従来の覆工が保有している機能の代替は行わない。覆工打設に係る費用が削減されるほか、掘削断面積の減少によって工費・工期の縮減が見込まれる。
- (2) パネル代替型：覆工の打設は行わないが、必要に応じて耐火パネルや内装パネル等で覆工の機能を代替する。パネル等の設置費用が発生するものの、覆工打設費用の削減と掘削断面積の減少によるコスト縮減により、従来の覆工を打設するよりも安価となることが見込まれる。
- (3) 吹付け代替型：覆工の代替として吹付けを施工する。従来の覆工打設時に必要であったセントル費用や養生期間が不要になるため工費および工期の縮減が見込まれる。

2.2 覆工省略時の機能

覆工省略型トンネルを適用するにあたり検討を要する主な機能は、表-1に示すものに大別される。

力学的機能としては、外力支持機能、余力保持機能、支保工補完機能が挙げられる。支保工により地山の安定性が確保されている場合は、これらの機能は必要とされないため、覆工を省略することができると考えられるが、将来的な地山の劣化

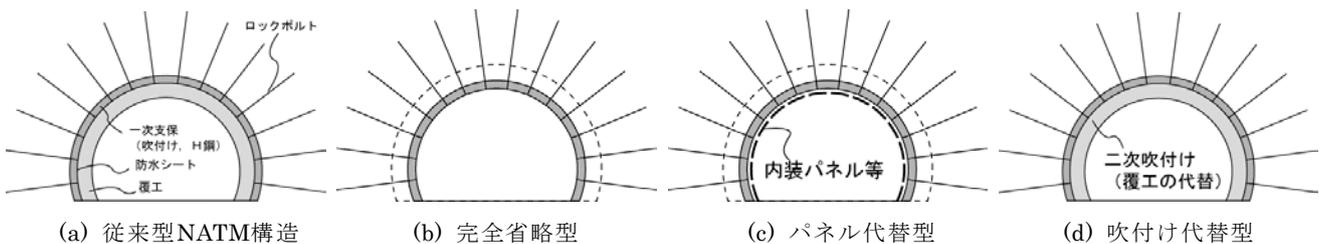


図-1 覆工省略型トンネルの構造の例

等により荷重が作用する懸念がある場合は、力学的に等価なもので代替する必要がある。支保工のみで地山を安定化することができず覆工にも荷重を負担させる場合や、トンネル完成後に土圧や水圧等の外力が作用することが明らかな場合等、鉄筋等により補強した覆工が必要となる場合は覆工の省略は困難であると考えられる。

防水機能については、降雨の影響等により滲水・滴水程度の湧水が発生してもそれを許容できる場合は省略できるものと考えられる。また、防水工をトンネル壁面に設置することによる景観上の問題を許容できる場合や、防水工の施工後に覆工の代替として吹付けを施工する場合は、それらの湧水対策により機能を代替できると考えられる。大量に湧水が発生する場合は、支保工の耐久性に影響を及ぼす可能性があるため、覆工省略は困難であると考えられる。

耐火機能については、地山の自立性が良く、火災によって支保工が損傷した場合でもトンネルの

崩壊には至らない場合には省略できると考えられる。地山の自立性が悪く、火災によって支保工が損傷したときにトンネルが崩壊する懸念がある場合は、耐火パネルや吹付け等で機能を代替する必要がある。

内装機能については、照明・換気効率の向上や視線誘導を要求されない場合は省略できると考えられる。これらの機能が必要な場合でも、内装工の設置により機能を代替することができ、また、吹付けの仕上がり状態によっては、機能を代替できると考えられる。耐火パネルを設置する場合は内装工を兼ねる場合もある。

設備保持機能については、地山が良好でアンカーの定着が将来的にも確保できる場合には、省略できると考えられる。

2.3 覆工省略型トンネルの適用条件

以上の観点から、覆工に外力が作用することが明らかななどの理由で鉄筋等による補強が必要な場合や、大量の湧水がある場合等は、覆工省略型トンネルの適用は困難であると考えられる。また、覆工省略時に、上述の機能代替方法を採用することでコストが増大する場合は、工期短縮効果等を勘案して総合的に判断する必要がある。

これらの条件を踏まえると、覆工省略型トンネルを適用できる可能性が高いのは、表-2に示す条件に適合するトンネルと考えられる。ただし、完全省略型およびパネル代替型については、後述するように一次支保としての吹付けと地山の付着力が将来的に失われた場合に力学的安定性が低下することが懸念されるため、適用にあたっては一次支保の長期的安定性や地山条件、交通条件等を考慮して個別に検討を行う必要がある。

表-1 覆工省略にあたって検討対象となる主な覆工の機能と覆工省略時の保有機能

覆工の機能	機能の概要	覆工省略時の保有機能			
		完全省略型	パネル代替型	吹付け代替型	覆工打設(従来型)
外力支持機能	トンネル完成後に作用する土圧や水圧に対して安定性を確保する	×	×	×	○
余力保持機能	将来的な地山の劣化等の不確定要素に対する安全率を確保する	×	×	○	○
支保工補完機能	支保工のみでは地山を安定化できない場合に覆工に荷重を負担させる	×	×	×	○
防水機能	覆工裏面の防水工により湧水を処理する	△	△	△	○
耐火機能	火災時にも支保構造に損傷を与えない	×	○	○	○
内装機能	照明・換気効率の向上や視線誘導を図る	×	○	△	○
設備保持機能	付属施設の取付け・保持を容易にする	×	×	○	○

○：機能有り △：機能は無いが条件によっては対策可 ×：機能無し

表-2 覆工省略型トンネルの適用条件

覆工省略のタイプ	適用条件
完全省略型*	<ul style="list-style-type: none"> 地山の自立性が良好で、かつ将来的な地山劣化の可能性が低い場合 将来的な地山劣化の懸念はあるものの、変状発生時に利用者に影響を及ぼす可能性が低く、対策も容易に実施できる場合（避難坑等）
パネル代替型*	<ul style="list-style-type: none"> 将来的な地山劣化の可能性は低いものの、地山の自立性が悪く、火災等により支保工が損傷を受けた場合にトンネルが崩落する可能性がある場合（耐火パネル等を設置） 地山の自立性が良好で、かつ将来的な地山劣化の可能性が低いものの、照明・換気の効率向上や視線誘導を図る必要がある場合（内装パネル等を設置）
吹付け代替型	<ul style="list-style-type: none"> 将来的な地山劣化が懸念されるため、余力保持機能が要求される場合
覆工省略不可	<ul style="list-style-type: none"> 覆工に外力が作用することが明らかななどの理由で鉄筋等による補強が必要な場合 大量の湧水がある場合

*適用にあたっては一次支保の長期的安定性や地山条件、交通条件等を考慮して個別に検討が必要

3. 覆工省略型トンネルの力学的特性

3.1 完全省略型・パネル代替型の耐荷力

完全省略型またはパネル代替型を採用する場合は、力学的な部材は一次支保のみとなる。その主要な支保部材のひとつとなる吹付けの役割としては、不連続面に囲まれた岩塊（キープロック）の安定化が重要であり、その耐荷力を支配する要因は地山と吹付けの付着力であると考えられている¹⁾。一方で、長期的な付着力の耐久性はもとより、付着力が失われた場合の力学的な安定性について検証された例はほとんど無い。ここでは、キープロックの抜け落ちによる局所的な荷重が吹付けに作用した場合を想定し、付着力の差が支保工の耐荷力および破壊メカニズムに及ぼす影響について、要素実験により検討した結果²⁾を示す。

実験は、図-2に示すように幅60 cmの岩塊が抜け落ちた場合を想定し、地山と吹付けの付着力をパラメータとして表-3の3ケースについて実施した。供試体は5cm厚の吹付けを模擬したプレーンコンクリートであり、附着板との付着力は吹付けと地山の付着力を模擬している。なお、付着力「中」のケースは、CI等級の地山で実測された付着力0.3 N/mm²程度³⁾を念頭に置いている。

載荷ジャッキの荷重-変位図を図-3に示す。いずれのケースにおいても、最大荷重に到達するまでの挙動は、まず附着はがれが発生し、その後附着はがれの範囲がロックボルト位置まで広がり、正曲げひび割れと負曲げひび割れの両方または一方が発生するとともに最大荷重に到達した。最大荷重は、ケース3、2、1でそれぞれ63 kN、22 kN、13 kNとなり、付着力が小さくなるにつれて減少した。

この結果から、厚さ5 cmの吹付けにおいては、キープロックの抜け落ちに対して、付着力の大小に関わらず曲げ破壊モードを示すが、最大荷重は附着強度に左右されることが分かった。すなわち、覆工を省略する場合は地山と吹付けの付着力を確保することが重要であり、湧水等により将来的に地山と吹付けの付着力が低下する懸念がある場合には、その対策を講じるとともに、力学的な安定性について検証する必要があると考えられる。

3.2 吹付け代替型の耐荷力

吹付け代替型を採用する場合は、一次支保の内側に二次吹付けを施工し、両者が力学的機能を有

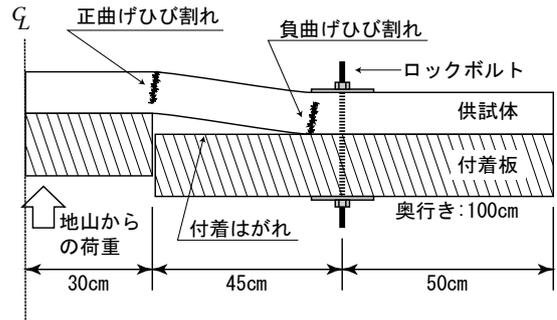


図-2 載荷状況および損傷の概要

表-3 附着実験ケース

ケース	付着力	附着板材料	附着強度 ^{※1} (N/mm ²)	供試体厚 (cm)	圧縮強度 ^{※2} (N/mm ²)
1	小	鋼板 (表面ショット プラスト処理)	<i>n. d.</i> ^{※3}	5	18.9
2	中	普通コンクリート (附着板打設3日 後に供試体打設)	>0.12 ^{※4}		21.3
3	大	普通コンクリート (附着板打設5時間 後に供試体打設)	0.61		20.7

※1) 載荷終了後の供試体で健全と思われる部分をコアリング(直径103mm)し測定
 ※2) 円柱状管理供試体の一軸圧縮試験により測定
 ※3) コアリング中に供試体がはく離したため測定不能
 ※4) 附着強度測定中に供試体が破壊

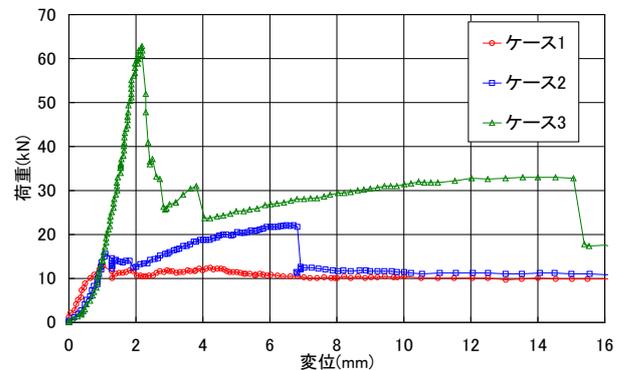


図-3 ジャッキの荷重-変位関係

する部材となる。このとき、一次支保と二次吹付けの付着力を十分に確保すれば、両者は合成構造となり、従来型NATMのように防水シートで縁切りされた二層構造よりは優れた耐荷力を有するものと想定される。しかし、一般にトンネルはアーチ形状であり、外力に対しては曲げと軸力がともに発生することが多く、このような条件下での耐荷力が検討された例はほとんどない。

そこで、図-4に示すように、地山の反力が確保された状態で天端から荷重が作用する場合を想定して、実大規模の載荷実験を実施し、表-4に示す供試体の構造耐力を比較した⁴⁾。ケースIは従来のNATM構造を念頭に置いた二層構造、ケースIIは一次吹付けと二次吹付けの付着が十分で合成構

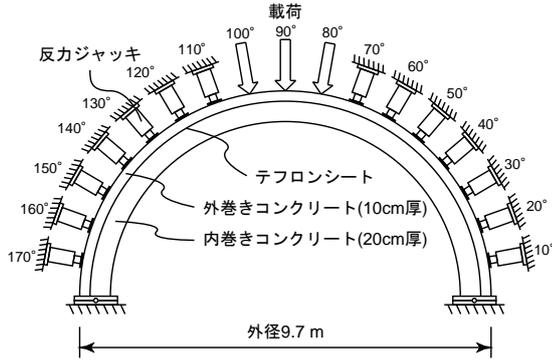


図-4 実験装置とケースI供試体の概要

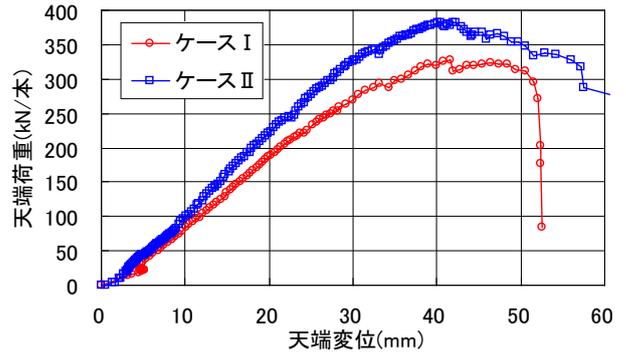


図-5 天端部の荷重-変位図

表-4 供試体の物性値

ケース	厚さ (cm)	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	材齢 (日)
I	外巻き	20.73	20.14	0.19	17
	内巻き	15.63	17.97	0.16	24
II	30	30.27	23.47	0.18	15

※いずれのケースも呼び強度18N/mm²のプレーンコンクリート

造となった場合を想定している。

荷重-変位図を図-5に示す。いずれのケースも変位40 mm程度で、天端部と両肩部が曲げ圧縮破壊することにより構造耐力に到達した。最大荷重は、供試体の強度のばらつきを考慮すると、ケースIとケースIIでほぼ同等のものであった。

限られた条件下での実験ではあるが、この結果は、防水シート等により縁が切られた二層構造の支保工は、構造全体では合成構造に近い耐荷力を有することを示しており、従来のNATM構造と同等の耐荷力を持たせるためには、強度が等しいコンクリートを使用する限りは、覆工と同じ厚さの二次吹付けが必要であることを意味している。換言すれば、二次吹付けを従来の覆工より薄肉化することによる掘削断面積の減少を図るには、高強度コンクリートを採用するなどの対策が必要であることを示している。

4. おわりに

覆工省略型トンネルを適用するにあたりなお課題として残されているのは、吹付けの長期的耐久性、漏水箇所の防水対策、耐震性の検証等であり、さらに二次吹付けを行わない場合は、将来的に一次支保としての吹付けと地山の付着力が低下した場合の対策が挙げられる。これらについては、今後、現場での試験施工や現地計測等により検討を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 水谷敏則ら：吹付けコンクリート薄肉覆工の支持機構に関する実験報告(1)、土木研究所資料、No. 2049、1984.
- 2) 日下敦、真下英人、水川雅之：キープロック落下に対する支保工の耐荷力特性に関する実験的研究、土木学会年次学術講演会、第62回、No.3-145、pp.289-290、2007.
- 3) 三谷浩二、吉塚守、吉武勇、中川浩二：崩壊事例に基づいた吹付けコンクリートの曲げ破壊検証実験、土木学会論文集、No.736/III-63、pp.249-259、2003.
- 4) 日下敦、砂金伸治、真下英人、角湯克典：二層吹付けコンクリートの耐荷力に関する一考察、土木学会年次学術講演会、第64回、No.3-406、pp.811-812、2009

日下 敦*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所道路技
術研究グループトンネル
チーム 研究員
Atsushi KUSAKA

真下 英人**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所道路技
術研究グループ長、工博
Dr. Hideto MASHIMO

角湯 克典***



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所道路技
術研究グループトンネル
チーム 上席研究員
Katsunori KADOYU