

覆工型枠の設置期間に着目した 覆工コンクリートの力学的挙動に関する一考察

長谷川 慶彦¹・日下 敦²・森本 智³

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6)
E-mail: hasegawa-y675bs@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6)
E-mail: kusaka@pwri.go.jp

³正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6)
E-mail: s-morimoto@pwri.go.jp

道路トンネル工事において、覆工コンクリートの養生方法等に明確な規定はなく、移動式型枠（セントル）の脱型時期についても、所要のコンクリート強度が得られた時点で脱型が行われている事例が多い。覆工品質の向上を図る一つの方法として型枠設置期間を延長し従来以上の養生期間を確保することが考えられる。そのため、型枠設置期間や脱型後の養生方法の違いが覆工コンクリートの品質に与える影響に関する基礎データ収集を目的として、2 トンネルにて試験施工を行い、覆工の力学的挙動や養生効果に関する長期的な検証を行った。

Key Words: mountain tunnel, lining quality, field test

1. はじめに

近年、公共構造物の老朽化や維持管理の在り方に社会的な関心が高まり、構造物のライフサイクルに渡る安全性と経済性を担保できる品質向上に対する要請が高まっている。山岳トンネルにおいても、覆工コンクリートの品質向上に向けた様々な取り組みが実施されている。しかし、その効果に関する知見は限られており、品質向上対策に対して長期的な視点で効果を検証した事例はほとんどないのが現状である。

覆工コンクリートの品質に影響を及ぼす施工条件は様々であると考えられるが、本研究では、一つの方策として、型枠設置期間に着目した。現在、道路トンネル工事では、覆工コンクリートの養生方法に基準類において統一された規定等はない。型枠の脱型時期についても、一般的に打設したコンクリートが自重に耐えうる強度（圧縮強度 2~3N/mm² 程度）に達することが判断材料として用いられ、覆工コンクリート打設後 12~20 時間程度で脱型されている事例が多い¹⁾。同一トンネルにおいて、型枠の設置期間を変更したスパンを設ける試験施工を行い、打設後の覆工コンクリートの挙動を計測および調査することによって、型枠設置期間の違いが品質に及ぼす

影響や建設段階で考慮すべき項目について検証を試みた。

2. 覆工品質に関する試験施工

(1) 試験施工の概要

本試験施工では、A、B トンネルの 2 トンネルを対象とした。A トンネルでは、型枠設置期間を一般的な 18 時間とマスコンクリートにおける標準的な養生時間となる 1 週間程度を目安とした 160 時間の 2 種類のスパンを設けた。各スパンでは、脱型後に 7 日間の湿潤養生を行っている。B トンネルでは、型枠設置期間を一般的な 18 時間と 42 時間の 2 種類とし、それぞれの型枠設置期間のスパンに対して、脱型後に湿潤養生を行ったスパンと水噴霧による養生のスパンを設け、計 4 種類のスパンを対象とした。

その他、コンクリートの打設方法やコンクリートの仕様（鉄筋の有無や配合、添加剤等）は、一般的なものとし、当初計画されていた内容に準じた。試験施工の条件を表-1 に示す。

(2) 対象トンネルの概要

試験施工を行ったトンネルは、いずれも NATM で施工された 2 車線の道路トンネルである。A トンネルにおける試験施工対象スパン周辺は、凝灰岩が分布し、支保パターンは CII-b であった。覆工構造は、設計巻厚 30cm の無筋構造であり、コンクリートの仕様は、設計強度 30N/mm²、スランプ 15cm、粗骨材の最大寸法 40mm、セメント種類は普通ポルトランドセメントである。B トンネルにおける試験施工対象スパン周辺は、硬質な花崗閃緑岩が分布していた。内空幅が約 13.4m であり、道路トンネル技術基準（構造編）・同解説²⁾における大断面区分に分類され、支保パターンは CII であった。覆工構造は、設計巻厚 40cm の無筋構造であり、コンクリートの仕様は、設計強度 21N/mm²、スランプ 15cm、粗骨材の最大寸法 20mm、セメント種類は高炉セメント B 種である。

両トンネルともに、対象スパンの選定にあたっては、覆工背面の拘束状態や断面形状の違いをなくすため、同一支保パターンかつ付属施設の箱抜き等がない連続したスパンを選定した。

(3) 調査項目

覆工内部にひずみ計、無応力計、有効応力計、温度計を配置し、打設直後から型枠脱型時およびその後の長期間にわたり計測を行い、覆工内部のひずみや応力状態の変化を確認した。各計測器の設置位置は、片側半断面における天端部、肩部、側壁部とした。計測機器の配置図を図-1 に示す。なお、計測断面は 3 断面設定し、ケース A-1 及びケース B-3、ケース B-4 ではスパン中央部 (B)、ケース A-2 及びケース B-1、ケース B-2 では B 断面に加えて、A 断面（既設覆工側）、C 断面（妻側）で計測を行った。

型枠脱型後は、前述の計測に加え、覆工表面を対象に、透気係数試験（トレント法）、反発硬度試験（シュミットハンマー）、ひび割れ調査を実施した。これらの調査は、試験施工対象スパンの覆工全面を対象とした。透気係数試験および反発硬度試験の実施箇所は、計測機器周辺を基本的な対象とし、天端 1 箇所、両肩部 2 箇所、両側壁部 2 箇所を 1 スパン 3 測線 (15 箇所/スパン) で行った。試験の実施頻度は、セントル脱型直後から 7 日、28 日、3 ヶ月、6 ヶ月、1 年を目安とした各段階とした。なお、ひび割れ調査は、目視による観察が可能な範囲で、0.1mm 程度の微細なひび割れやうき・はく離等の変状を確認するため、近接目視および打音検査により実施した。

表-1 試験施工の条件

トンネル	ケース	支保	内空幅	地質	覆工厚	配合	セントルの設置期間 (h)	養生	養生期間	測線
A	ケース A-1	CII-b	約 10.7m	凝灰岩	30cm	30-15-40 (N)	18	湿潤養生	7 日	B
	ケース A-2						160	湿潤養生	7 日	A, B, C
B	ケース B-1	CII	約 13.4m (大断面)	花崗閃緑岩	40cm	21-15-20 (BB)	18	湿潤養生	7 日	A, B, C
	ケース B-2						42	湿潤養生	7 日	A, B, C
	ケース B-3						18	水噴霧	—	B
	ケース B-4						42	水噴霧	—	B

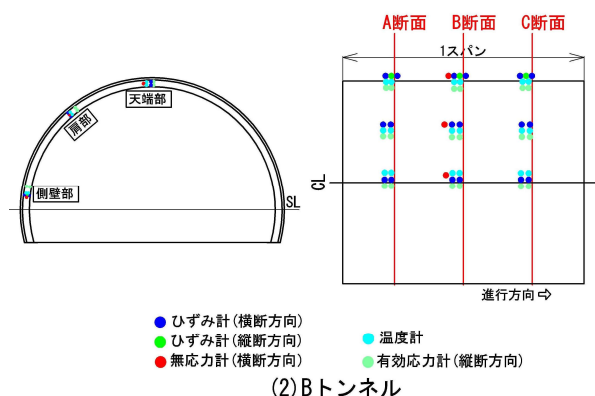
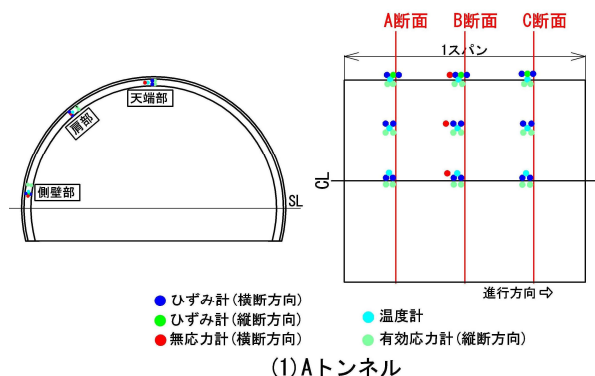


図-1 計測機器配置図

3. 試験施工結果

(1) 脱型前後のひずみ、応力等の計測結果

各スパンにおける計測結果については、全スパンで計測を行っている B 断面の結果について記載する。図-2 に打設完了時を初期値とした天端部におけるコンクリート温度とひずみ（内側）の関係を示す。縦軸は、ひずみ（ $\times 10^6$ ）を表しており、正側が引張、負側が圧縮とし、横軸はコンクリート温度を表す。打設時のコンクリート温度は、A トンネルで約 17℃、B トンネルで約 23℃である。いずれのケースでも、打設直後のコンクリート温度が水和反応により 40℃程度まで上昇し、ひずみは引張側（膨張側）に増加する。温度上昇過程では、打設直後にやや傾きが大きく、その後は温度の上昇に対してほぼ一定の割合でひずみが増加する。

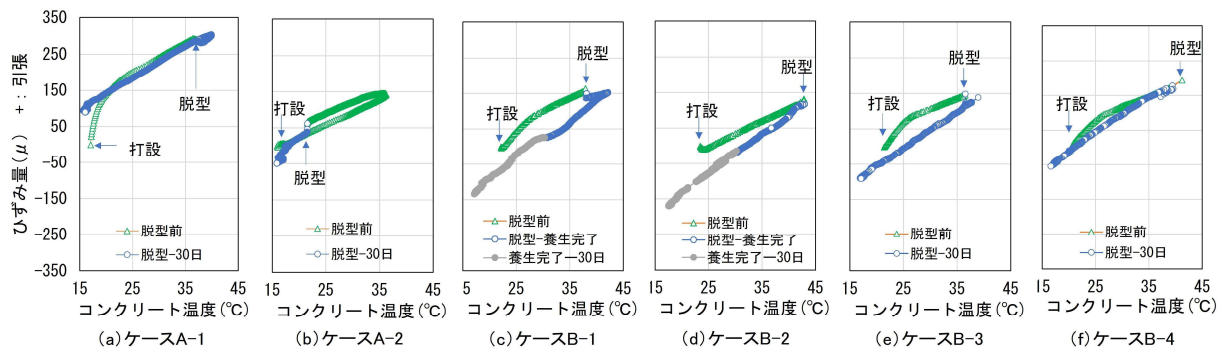


図2 弱材齢時のコンクリート温度とひずみの関係 (覆工内側)

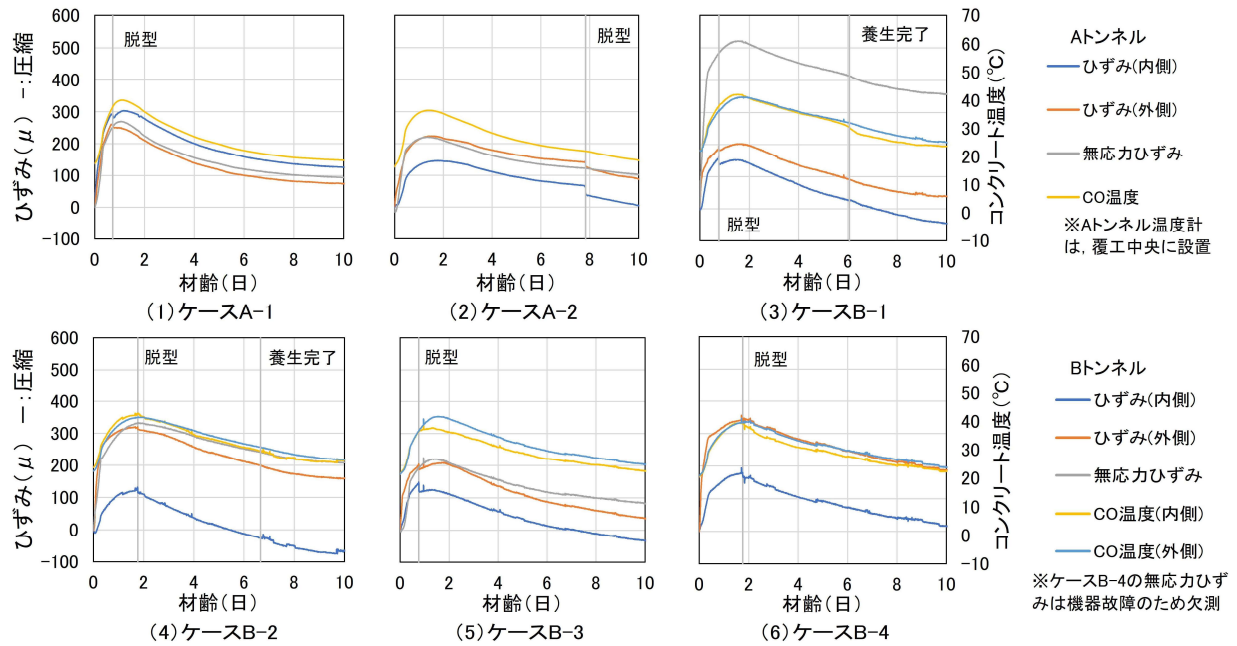


図3 弱材齢時の計測結果 (ひずみ, 無応力ひずみ, コンクリート温度)

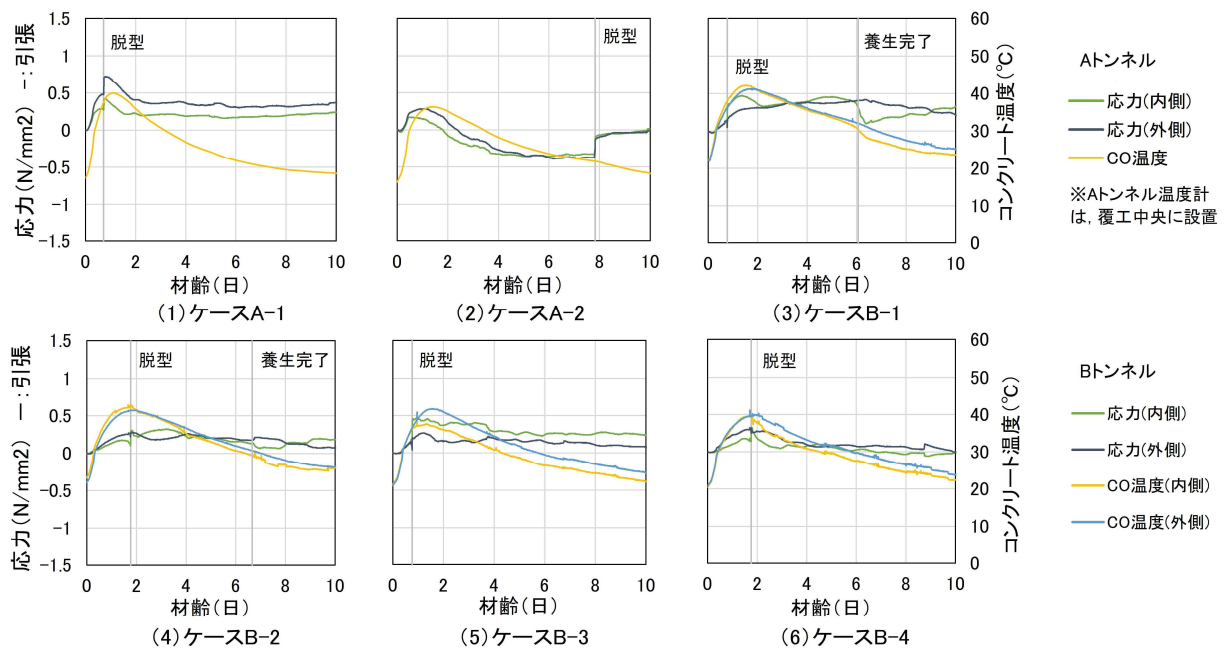


図4 弱材齢時の計測結果 (応力, コンクリート温度)

コンクリート温度が最高温度に達し、温度低下に移行すると、ひずみは圧縮側（収縮）に移行する。A トンネル、B トンネルのいずれも18時間脱型の場合、脱型後もコンクリート温度の上昇が見られ、引張側にひずみが増加する傾向にある。B トンネルの42時間脱型の場合、型枠設置期間ではコンクリート温度は上昇し続け、脱型とほぼ同時にコンクリート温度が低下し、圧縮側のひずみが発生する傾向が確認された。A トンネルの160時間脱型の場合、型枠設置期間中にコンクリート温度が最高温度となり、その後は徐々に低下して、ひずみが圧縮側にシフトする。各ケースにおける温度変化に対するひずみの変化量はほぼ一定であり、大きな差異は見られない。

図-3 に打設完了時を初期値とした各ケースにおける B 断面天端部にて計測した 10 日間のひずみ、無応力ひずみ、コンクリート温度の経時変化を、図-4 に同じ期間内における応力、コンクリート温度の経時変化を示す。図-3 の左縦軸はひずみ量（ $\times 10^6$ ）を表しており、正側が引張、負側が圧縮である。図-4 の左縦軸は、応力（ N/mm^2 ）を表しており、正側が圧縮、負側が引張である。いずれも右縦軸はコンクリート温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）、横軸は経過日数を表している。無応力ひずみは、外力や拘束によるひずみ値を除外した温度変化や自己収縮、乾燥収縮ひずみである。なお、ケース B-4 の天端部における無応力ひずみについては、計測機器の故障により計測不可となった。

ひずみ（外側）の値は、ひずみ（内側）と同様にコンクリート温度の上昇に伴い引張ひずみが増加するとともに、脱型時には瞬間的に圧縮のひずみが増加する。無応力ひずみは、脱型の影響はなくコンクリートの温度変化と同様に推移しており、脱型時の変化はない。

応力に関しては、いずれのケースにおいても打設直後から圧縮側の応力が発生し、脱型時に瞬間的に圧縮側の応力が増加する。ケース A-2 では、打設後に圧縮側の応力が発生した後、引張側の挙動を示し、最大で 0.66N/mm^2 の引張応力を計測した。これは、ひずみが全体的に圧縮側の挙動を示す中、型枠により圧縮ひずみが拘束され、引張応力が発生していると考えられる。その他のケースにおいては、ほぼ圧縮側の挙動を示している。

(2) 長期的なひずみ、応力等の計測結果

図-5 に打設完了時を初期値とした B 断面の天端部における長期的なひずみ、無応力ひずみ、コンクリート温度の経時変化を、図-6 に応力、コンクリート温度の経時変化を示す。計測期間は、A トンネルで約 1000 日間、B トンネルで約 700 日間である。無応力ひずみは、コンクリートの温度変化に追随しながら徐々に圧縮ひずみが増加していく。各トンネルにおけるそれぞれのケースにおいて、変化の挙動に大きな違いは見られない。ひずみに関

しても同様の傾向を示しているが、概ね材齢 400 日以降では、これらの圧縮ひずみの増加の傾きが緩やかになる傾向が認められ、収束に向かっていると考えられる。応力に関しては、徐々に圧縮応力が増加する傾向が認められるが、概ね 400～500 日間経過後に傾きが緩やかになり、収束傾向にあることが確認できる。また、ケース A-1 および B トンネルにおいては、外側の圧縮応力の増加が大きい傾向が認められる。

図-7 に全計測期間における B 断面天端部のコンクリート温度とひずみ（内側）の関係を示す。A トンネルは、温度変動の繰り返しとともに徐々に圧縮側のひずみが増加している傾向にあるが、概ね 500～600 日以降は徐々に収縮量が減少する傾向にある。B トンネルについても同様の傾向であり、概ね 400 日以降に収縮量が減少する傾向にある。これより、覆工コンクリートの乾燥収縮は、概ね 400～500 日程度で収束に向かうと考えられる。

表-2 に各ケースにて計測した最大引張ひずみと計測最終時点でのひずみ量、および計測最終時点での応力の値を示す。最大引張ひずみは、コンクリート温度が最高温度到達時に計測され、無応力ひずみが最も大きい。また、内側と外側を比較すると、一部を除いて外側が相対的に大きな値を示す。A トンネルでは、計測最終時点では内側ひずみの収縮量が外側よりも大きく、収縮量はケース A-2 のほうが小さくなっている。B トンネルにおいてもケース B-2 を除いて内側ひずみの収縮量が外側よりも小さく、収縮量は湿潤養生なしのケースの方が小さくなっている。

(3) 長期的な調査結果

a) 透気係数・反発硬度試験結果

図-8 に 1 スパンあたり 15 箇所の透気係数試験結果を示す。(a) は、各材齢における透気係数のスパンの平均値の推移、(b) は、脱型 1 年後における 1 スパンあたり 15 箇所の透気係数の評価の度数分布を示す。透気係数は、値が小さいほどコンクリート表面が緻密であることを示している。コンクリート表層の緻密性が十分に得られている場合、ひび割れに対する抵抗性や外部からの劣化因子の侵入に対する抵抗性の向上が期待できると考えられている³⁾。

透気係数は、脱型後の初期段階では、いずれのトンネルも型枠設置期間の長いケースのほうが小さい値を示している。脱型から 1 年後の結果を比較すると、A トンネルでは両者は同等の値を示しているが、B トンネルではケース B-1 とケース B-3 がやや大きな値を示し、その他はやや低く、同等の値を示している。(b) のスパンあたり 15 箇所の透気係数の評価では、ケース A-1 のみ 1 箇所 $0.001\text{--}0.01$ ($\times 10^{-16}\text{m}^2$) の範囲内の箇所があり、それ以外は全て $0.01\text{--}10$ ($\times 10^{-16}\text{m}^2$) の範囲内にある。A トン

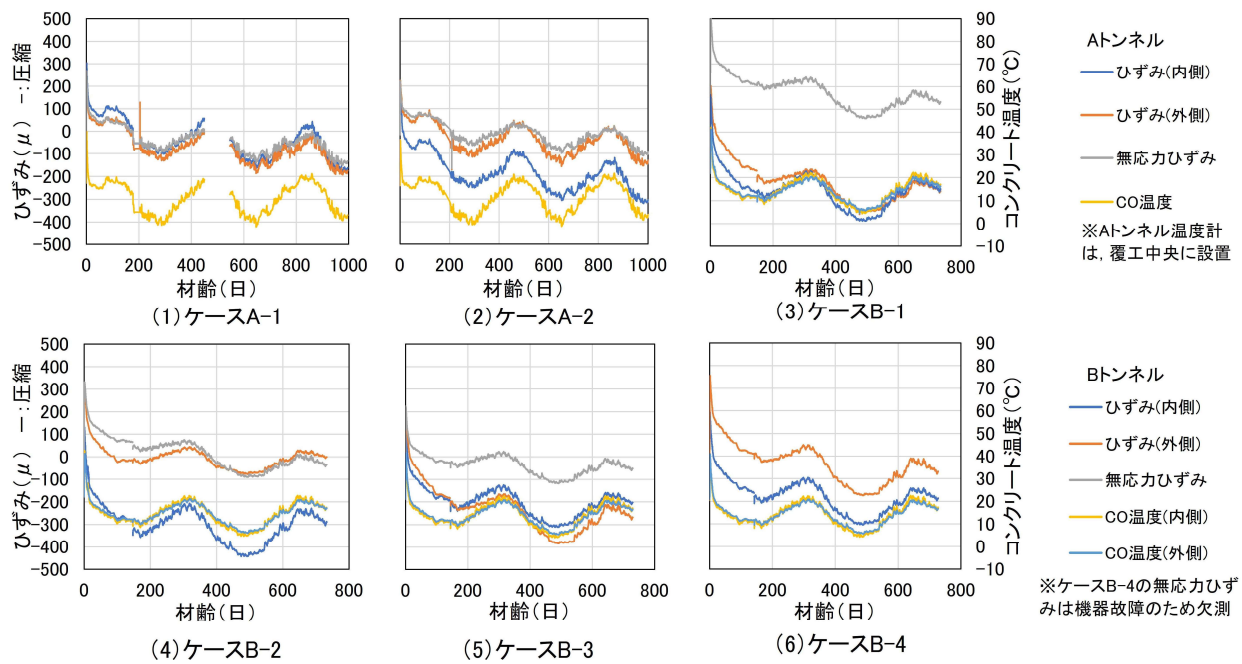


図-5 長期の計測結果（ひずみ，無応力ひずみ，コンクリート温度）

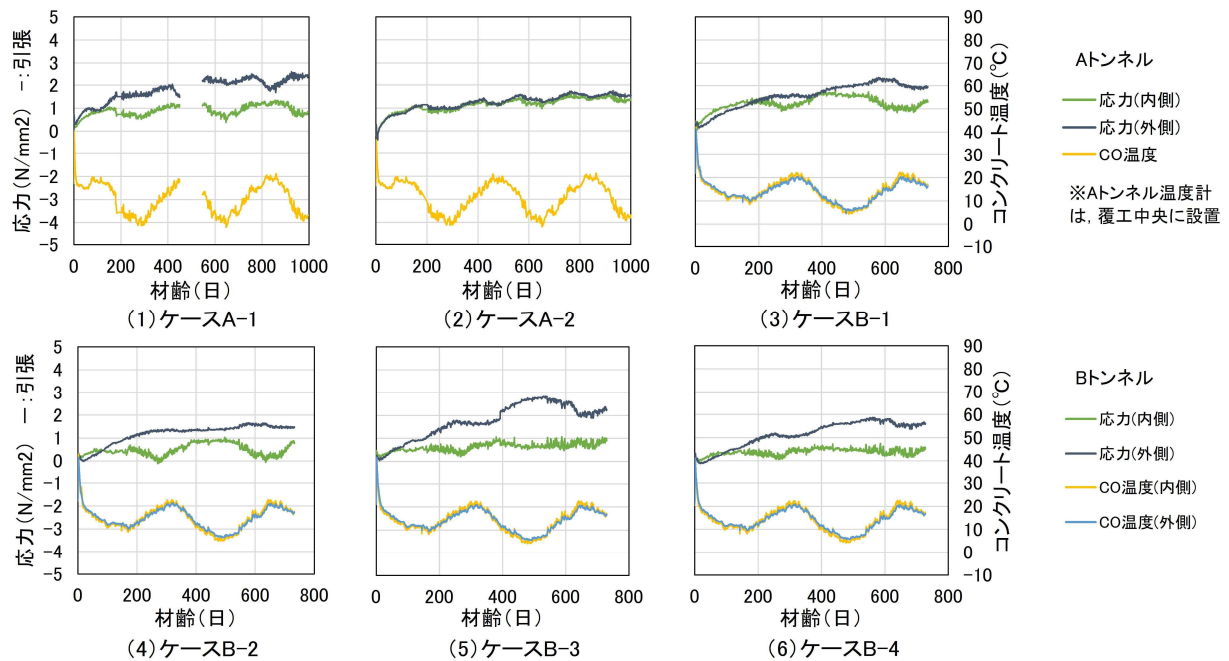


図-6 長期の計測結果（応力，コンクリート温度）

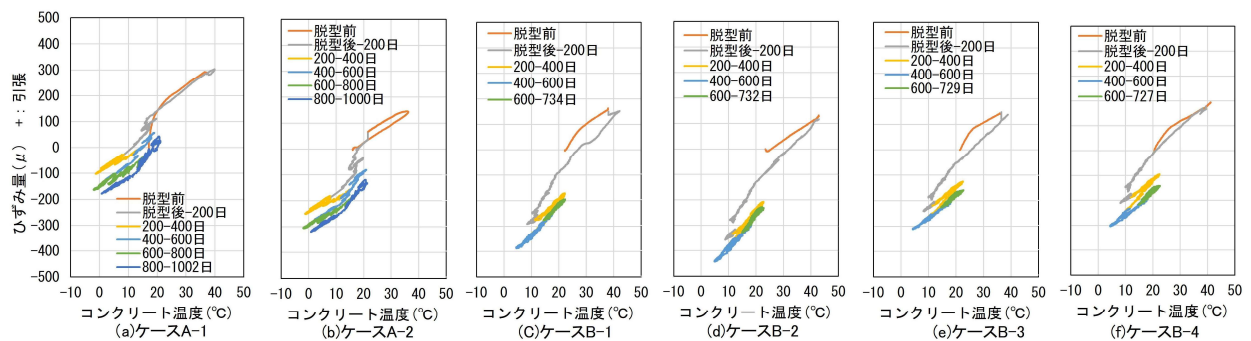


図-7 全計測期間におけるコンクリート温度とひずみの関係（覆工内側）

表-2 ひずみ，無応力ひずみ，応力計測結果

ケース	天端										応力 (内側)	応力 (外側)
	ひずみ(内側)			ひずみ(外側)			ひずみ(無応力)					
	最大 引張	計測 最終	最大引 張との 差	最大 引張	計測 最終	最大引 張との 差	最大 引張	計測 最終	最大引 張との 差			
	(μst)									(N/mm2)		
ケースA-1	303.9	-163.2	467.1	261.1	-176.0	437.1	269.9	-132.3	402.3	1.04	1.08	
ケースA-2	146.0	-305.2	451.2	223.7	-133.6	357.3	220.4	-95.2	315.6	1.68	0.90	
ケースB-1	163.3	-250.6	413.9	202.5	-259.1	461.7	521.2	131.4	389.8	1.29	1.95	
ケースB-2	131.8	-288.5	420.4	321.2	-0.6	321.8	332.7	-35.7	368.5	0.75	1.48	
ケースB-3	148.4	-202.4	350.9	214.0	-268.7	482.7	223.7	-53.1	276.7	0.92	2.25	
ケースB-4	194.1	-187.4	381.6	356.5	-69.4	425.9	欠測	欠測	-	0.51	1.60	

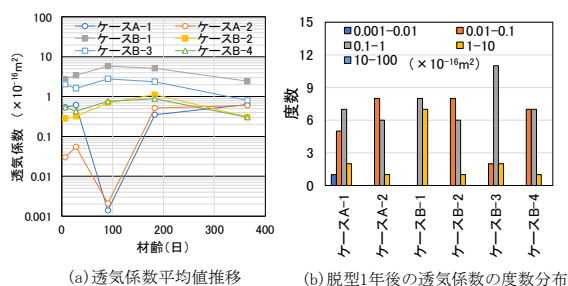


図-8 透気係数試験結果

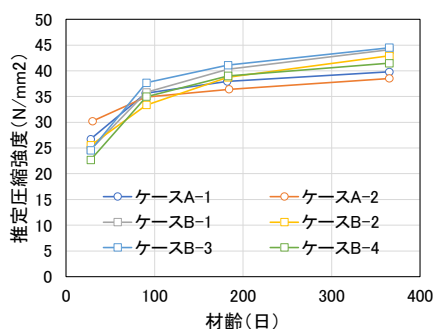


図-9 反発硬度試験結果

ネルを見ると、型枠設置期間を延長したケース A-2 の方が透気係数の値が小さくなる箇所が増加している。B トンネルにおいて、養生条件が同一であるケース B-1 とケース B-2、ケース B-3 とケース B-4 をそれぞれ比較すると、いずれにおいても型枠設置時間を延長している方で透気係数の値が小さい箇所が増加している。一方、同一の型枠設置期間で湿潤養生有無の違いであるケース B-1 とケース B-3、ケース B-2 とケース B-4 を比較すると、型枠設置期間が 18 時間の場合は、湿潤養生ありのケースで透気係数の値が大きい箇所が多くなる。また、型枠設置期間が 42 時間の場合は、湿潤養生有無で大きな違いは見られない。B トンネルの覆工コンクリートには、高炉セメントが使用されているため、A トンネルよりも型枠設置期間による養生効果の影響を受けた可能性が考えられる。これより、型枠設置期間を伸ばすことで、コンクリートの表面が緻密になることが期待できる可能性が示唆される。

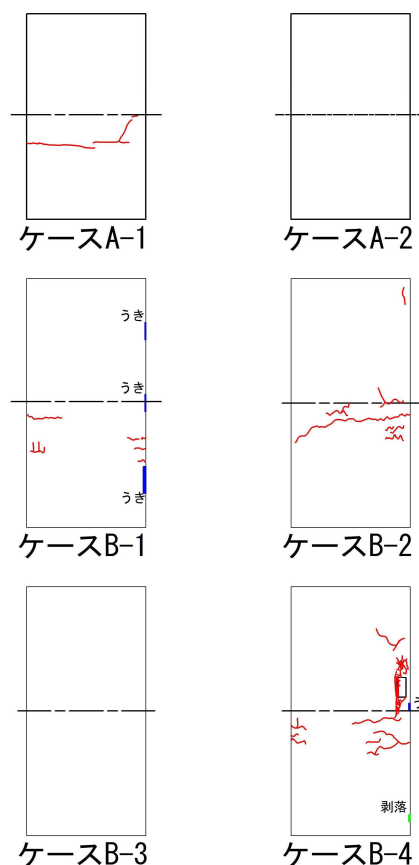


図-10 ひび割れ調査結果

図-9に1スパンあたり15箇所の反発硬度試験結果の平均値と材齢の関係を示す。推定圧縮強度は、いずれのトンネルにおいても脱型から1年経過後まで増加する傾向にある。しかし、脱型から3ヶ月目以降は推定圧縮強度の増加勾配が緩やかになっていることから、強度発現が収束傾向であることが確認される。各トンネルにおける推定圧縮強度の値は、36.4~44.5N/mm²の範囲内にあり、大きな差はなく設計基準強度以上となっており、各ケースでの明確な差は見られない。

b) ひび割れ調査結果

脱型から1年後のひび割れ調査の結果を図-10に示す。A トンネルでは、ケース A-1 において、天端から肩部にかけてトンネル縦断方向に伸びる最大幅0.4mm程度のひび割れが確認された。このひび割れは、脱型から1年後の調査時に確認されていることから、脱型完了から6ヶ月~1年の期間内に発生している。なお、発生している変状はひび割れのみである。一方、ケース A-2 では、脱型後1年経過時点ではひび割れやうき・はく離等の変状は確認されていない。

B トンネルでは、通常の脱型時間かつ湿潤養生なしのケースであるケース B-3 では変状が確認されず、その他のスパンで変状が発生する結果となった。発生しているひび割れは主に縦断方向である。その他、目地部のうきや剥落も一部で確認されている。ひび割れの最大幅は、

ケース B-2 の天端部における 0.2~0.4mm 程度のひび割れであり、その他のスパンは 0.15mm もしくは 0.1mm 以下のひび割れである。最大ひび割れ幅に関しては、A、B トンネルともに同等程度の規模となっている。また、ケース B-4 では、天端部に位置する型枠窓部に亀甲状のひび割れも確認された。B トンネルにおけるこれらのひび割れは、打設完了から 6 ヶ月目の調査時に確認されており、打設完了から 3 ヶ月~6 ヶ月の期間内に発生している。両トンネルともに、ひび割れ発生時期は、A トンネルでは 10 月~4 月、B トンネルでは 1 月~4 月の期間内であり、1 年間の季節変動の中でコンクリート温度が低くなる冬季に変状が発生していると考えられる。

ひび割れの発生原因としては、両トンネルともに幅が最大で 0.4mm 程度と軽微なことから、材質劣化に起因するものである可能性が高いと推察される。

4. おわりに

本研究では、型枠の脱型時期の違いや湿潤養生の有無に着目し、2 トンネルにおいて、一般的な型枠設置時間（18 時間）と型枠設置期間を延長したケース（42 時間、160 時間）を設定した試験施工を実施した。その結果、以下の結果が得られた。

- 1) 型枠設置期間の違いにより、弱材齢時のひずみ挙動や発生応力、脱型時のコンクリート温度に違いが生じた。また、脱型時には瞬間的に圧縮ひずみや圧縮応力が増加する傾向にある。
- 2) 長期的なひずみの挙動は、コンクリート温度の変動に追従して変動する。温度上昇段階の方が温度低下段階よりも、コンクリート温度の変化に対するひずみの変動が小さい傾向にあり、徐々に圧縮ひずみが増加する。全体のひずみや応力の挙動について、各ケースで明確な差は見られず、概ね 400 日~500 日経過した段階でやや収束傾向に向かっていると考えられる。

- 3) 透気係数については、型枠設置期間を長くすることで、小さくなる傾向がある可能性が示唆された。しかし、養生の有無では、大きな違いはない結果となった。
- 4) A トンネルにおいて、一般的な脱型時間を確保したケースでは、脱型から 1 年後に軽微なひび割れが確認されたが、型枠設置期間を延長したケースでは、1 年後も近接目視による観察で変状が確認されなかった。一方、B トンネルにおいては、一般的な脱型時間である 18 時間、湿潤養生なしのケースでは変状が確認されなかったが、その他のケースではひび割れ等の変状が確認された。養生条件を変化させた場合の変状発生状況は、A トンネルと B トンネルで逆の傾向となり、型枠設置期間や養生有無等との明確な関連性は見られなかった。

型枠設置期間の違い等による覆工コンクリートの変状との関連性について、明確な差は認められていないが、今後も変状の発生や進行性について追跡調査を行い、覆工コンクリートの品質への影響について検討していきたい。

謝辞： 検討を行うにあたり、対象トンネルの設計、施工条件、計測データ等をご提供いただいた北海道開発局および東北地方整備局の関係各位に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，p.193，2016.
- 2) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説，p.129，2003.11.
- 3) 国土交通省東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）（トンネル覆工コンクリート編），p.15，2016.5.

(2020. 8. 7 受付)

INFLUENCE OF CURING DURATION TIME WITH LINING FORM ON MECHANICAL BEHAVIOR OF CAST-IN-PLACE LINING

Yoshihiko HASEGAWA, Atsushi KUSAKA and Satoshi MORIMOTO

In road tunnel construction, there is no unified rules of curing method of cast-in-place lining after demolding. Tunnel lining form is often removed when the concrete reaches the required strength. For improvement of lining quality, longer curing duration time with lining may be effective. We carry out two field tests which deferent curing duration time with lining form and curing method for the purpose of grasping behavior and defects of lining concrete, and collected basic data of lining quality for ling term.