

覆工型枠の設置期間の違いによる 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・森 本 智・日 下 敦

道路トンネルの覆工コンクリートの施工においては、コンクリート打設後、所定の強度が発現したことを確認して脱型される。ただし、具体的な養生方法については統一された規定はなく、現場ごとに様々な工夫が行われている。覆工品質のさらなる向上を図る一つの方策として、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が、脱型時のコンクリートの力学的挙動や、その後の覆工の変状発生状況については明確になっていない。本研究では、実際のトンネルにおいて覆工の型枠設置時間を変えた試験施工を行い、覆工の挙動に関して基礎的なデータを収集した。本稿では本研究の詳細および収集された基礎的な計測結果について紹介する。

キーワード：山岳トンネル、覆工コンクリート、品質向上、試験施工、長期計測

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。道路トンネルにおいても、利用者の安全性に影響を及ぼすうき・はく離、はく落等が完全には防止できていないのが現状であり、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、施工時に実施した品質向上対策に対して維持管理段階においてどのような効果が得られているか等、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等の要因は様々であると考えられるが、本研究では、一つの着眼点として、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 $2\sim 3\text{ N/mm}^2$ 程度）に達することが判断材料として用いられ、覆工コンクリートの打設後 $12\sim 20$ 時間程度で脱型されている事例が多い¹⁾。本稿では同一トンネルにおいて、移動式型枠（セントル）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等についての検証を試みたの

でその内容を紹介する。

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トンネルの型枠設置期間は、一般の山岳トンネルにおいて一般的な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週間を目安とした160時間の2種類のスパンを設けた。Bトンネルでは、一般的な18時間と42時間の型枠設置期間としたスパンを設け、それぞれに対して、脱型後に湿潤養生および水噴霧による養生のスパンを設けた計4種類のスパンを設定した。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

対象トンネルは、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トンネルの対象スパン周辺は、凝灰岩が分布し、支保パターンはCII-bであった。覆工の仕様は、設計巻厚30cmの無筋構造、コンクリートの配合は、30-15-40(N)である。Bトンネルにおける対象スパン周辺は、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

表一 計測の仕様 (BOTDR 方式の一例)

トンネル	ケース	支保	内空幅	地質	覆工厚	配合	型枠 設置期間 (h)	養生	養生期間	測線
A	ケース A-1	C II-b	約 10.7 m	凝灰岩	30 cm	30-15-40 (N)	18	湿潤養生	7 日	B
	160						湿潤養生	7 日	A, B, C	
B	ケース B-1	C II	約 13.4 m (大断面)	花崗閃緑岩	40 cm	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

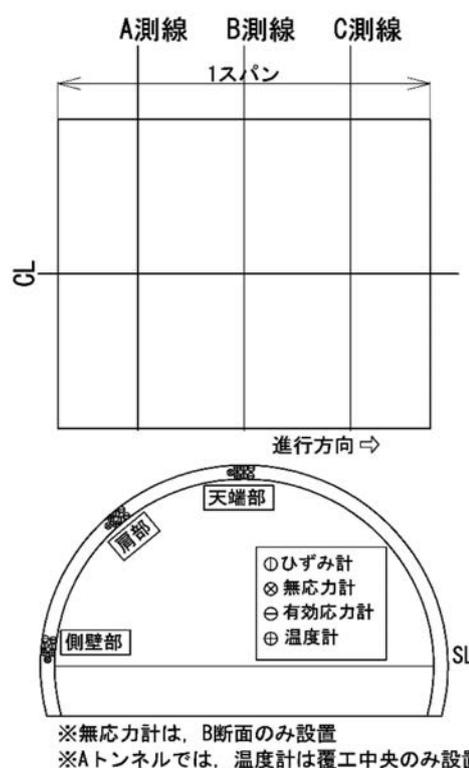
類され、支保パターンはC IIであった。覆工の仕様は、設計巻厚 40 cm の無筋構造、コンクリートの配合は、21-15-20 (BB) である。両トンネルともに、対象スパンの選定にあたっては、覆工背面の拘束状態や断面形状の違いをなくすため、同一支保パターンかつ付属施設の箱抜き等がない連続したスパンを選定とした。

(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、打設直後から長期間にわたる計測を行い、覆工内部のひずみや応力状態の推移を確認した。計測にあたっては、1 スパンあたりスパン中央部、既設覆工側、妻側の 3 測線を設け、それぞれの片側半断面における天端部、肩部、側壁部に計測機器を設置した。計測機器配置図を図一に示す。ここで、ひずみ、応力、B トンネルにおける温度については、覆工の内側、外側にて計測を行っている。ケース A-2、ケース B-1、ケース B-2 では、A ~ C の 3 測線で計測を行い、その他のケースでは、B 測線のみの計測としている。

型枠脱型後は、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)、ひび割れ調査を実施した。これらは、試験施工スパン全面を対象とした。透気係数試験および反発硬度試験の実施箇所は、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。試験の実施時期は、型枠脱型直後、7 日、28 日、3 ヶ月、6 ヶ月、1 年を目安とした各段階とした。ひび割れ調査は、近接目視および打音検査により、目視による確認が可能な範囲で 0.1 mm 程度の微細なひび割れやうき・はく離等の変状の有無を確認した。

本稿では、これらの計測結果について、全スパンにて計測を行っている B 測線の天端部における計測結果について、述べていく。

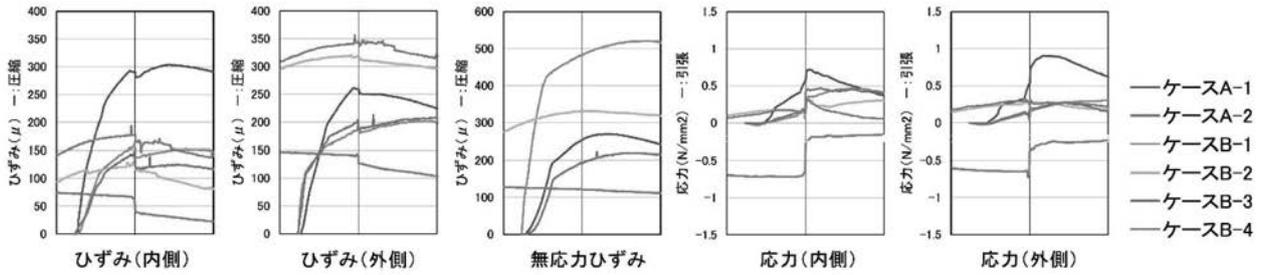


図一 計測機器配置図

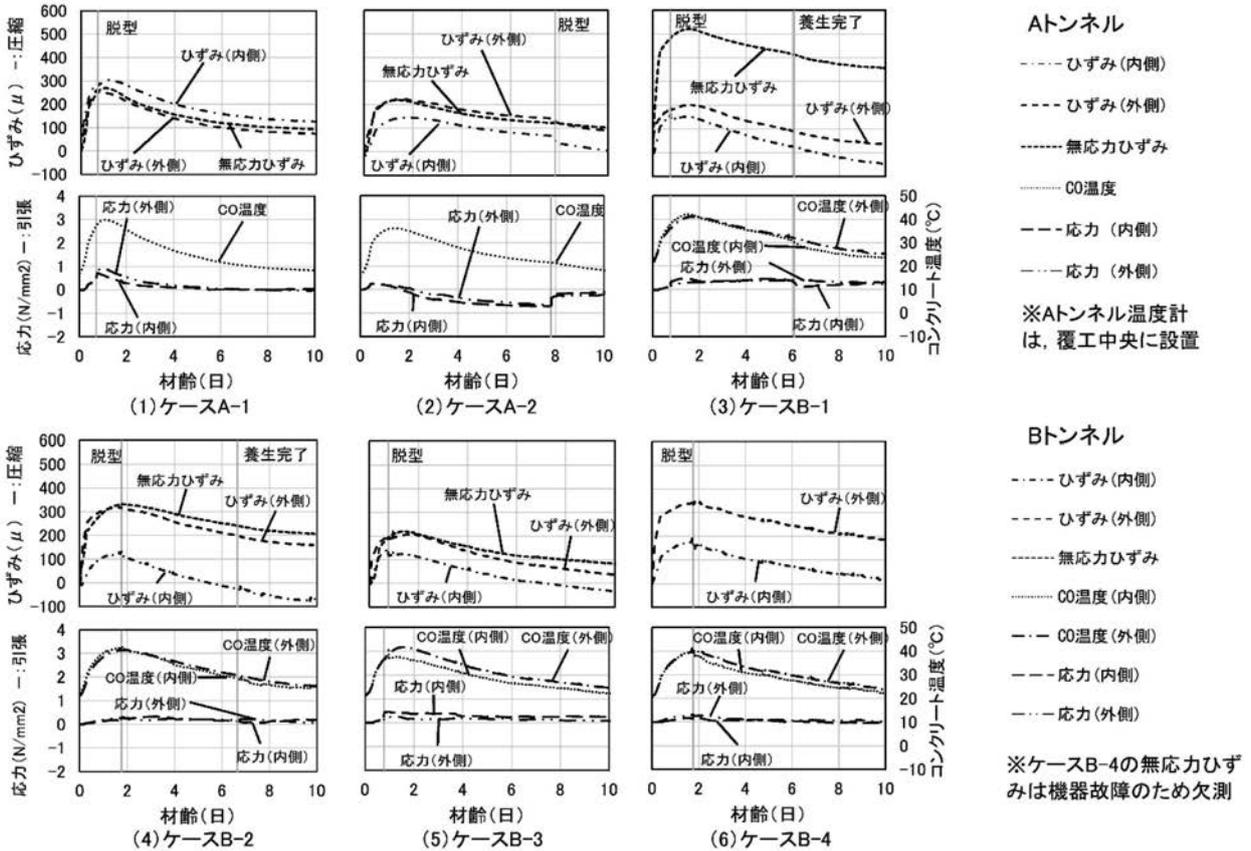
3. 試験施工結果

(1) 脱型時におけるひずみ、応力の挙動

図二に脱型時におけるひずみ (内側、外側)、無応力ひずみ、応力 (内側、外側) の計測結果を示す。無応力ひずみは、外力や拘束によるひずみを除外したものであり、コンクリートの乾燥収縮や温度伸縮によるひずみを表す。ひずみは負側が圧縮、正側が引張を示し、応力は負側が引張、正側が圧縮を示す。横軸は、脱型時を基準とした前後約 1 日の期間を示しており、横軸中央が脱型時を示している。なお、ケース B-4 の無応力ひずみについては、計測機器の故障により計測



図一 脱型時の挙動



図一 短期の計測結果

不可となった。

ひずみ(内側, 外側)は、型枠の脱型時に覆工の自重の影響により、瞬間的に圧縮ひずみが増加する。その際に発生する圧縮ひずみは、8～29 μ 程度の値を示している。一方、無応力ひずみに関しては、外力等の影響を除外しているため、脱型時の影響は見られない。応力に関しても、ひずみ(内側, 外側)と同様であり、脱型時に瞬間的に圧縮応力が発生しており、その値は0.1～0.4 N/mm²程度となっている。

(2) 短期的なひずみ, 応力等の計測結果

図一 3 に打設完了時を初期値とした各ケースにおける10日間のひずみ, 無応力ひずみ, 応力, コンクリート温度の変化を示す。各ケースにおける上段がひずみ

(内側, 外側), 無応力ひずみの変化を示し, 下段はコンクリート温度, 応力(内側, 外側)の変化を示している。

打設時のコンクリート温度は, Aトンネルで17℃程度, Bトンネルで23℃程度であり, 打設直後からセメントの水和反応により温度上昇し, 打設から30～40時間で40℃程度まで達する。コンクリート温度の上昇に伴い, ひずみが引張側(膨張側)に増加していき, 150～350 μ 程度の引張ひずみが発生する。

型枠設置期間が18時間の場合, 最高温度到達前の脱型となることから, 脱型後に圧縮ひずみが増加した後, 再び引張側のひずみが増加する。42時間の場合, 脱型とコンクリート温度の最高温度への到達はほぼ同時であり, 脱型後には温度の低下とともに圧縮ひずみ

が増加していく。160 時間の場合、型枠設置期間中にコンクリート温度が最高温度に到達し、温度の低下とともにひずみが圧縮側にシフトしていく。

応力に関しては、ケース A-2 では、型枠設置期間中に最大 0.72 N/mm^2 の引張応力が発生した。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たことによると考えられる。

型枠設置期間を 40 時間程度以上まで延長すると、脱型時のコンクリート温度が最高温度付近あるいはそれ以降になることから、温度上昇中の 18 時間の場合と比較すると脱型直後のひずみ挙動がやや異なる結果となった。しかし、脱型時の圧縮ひずみの増加量や温度低下に移行した際のひずみの挙動に明確な差異は認められなかった。また、型枠設置期間を 160 時間まで延長すると、型枠の拘束により引張応力が発生するが、その値は最大 0.72 N/mm^2 と小さかった。

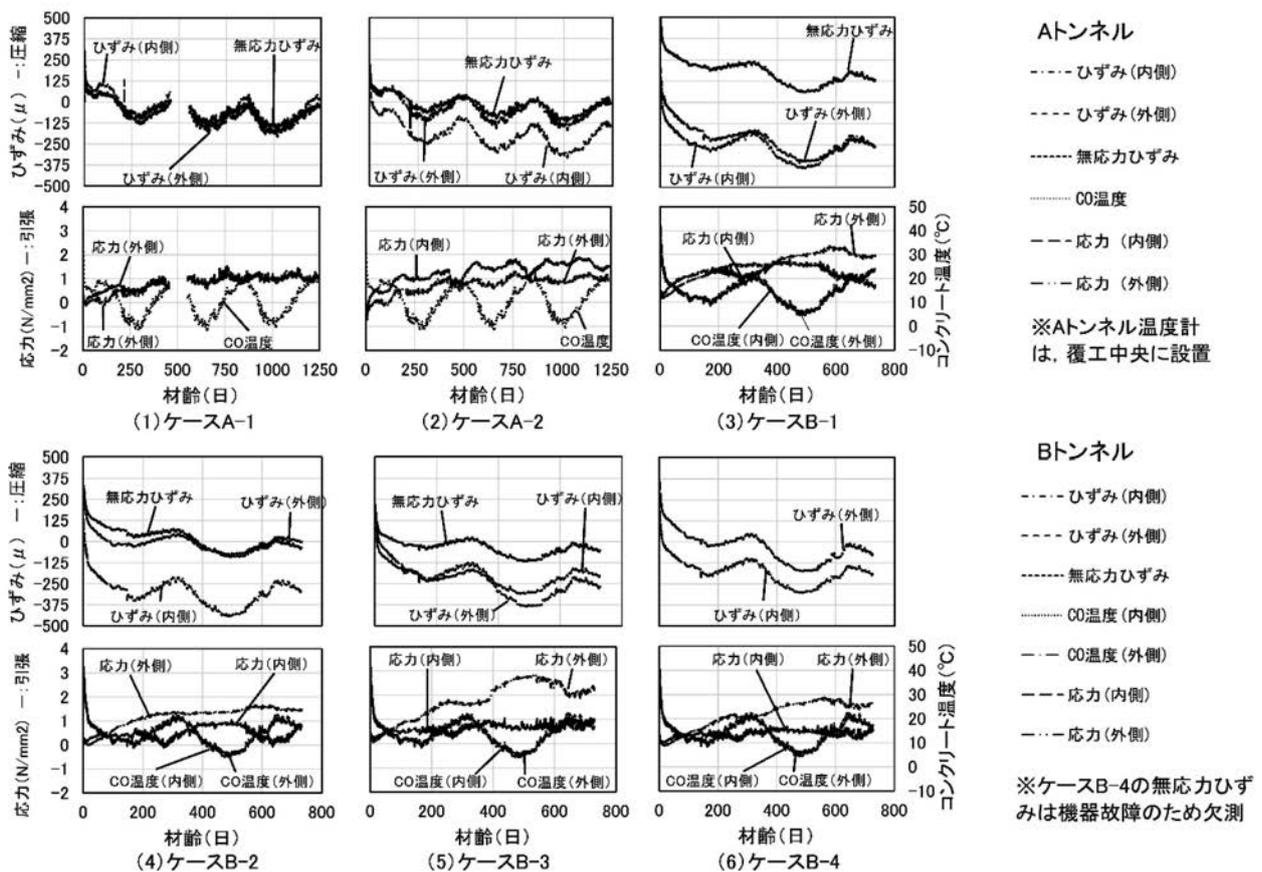
(3) 長期的なひずみ、応力等の計測結果

図一 4 に打設完了時を初期値とした長期的なひずみ、無応力ひずみ、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 1250 日間、B トンネルで約 700 日間である。いずれのケースにおいても、ひずみの値は、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、変化の挙動に明確な差異は見られない。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た。

図一 5 に B 断面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。A トンネルでは打設から 300 日後、B トンネルでは打設後 200 日経過時点から計測最終時点までの結果を示している。これらのグラフからも、コンクリート温度の変動に追随しながら徐々に圧縮ひずみが増加することがわかり、これらは乾燥収縮等によるひずみと考えられる。A トンネルでは、600 日程度経過した地点で圧縮ひずみの増加がやや収束の傾向を示し、800 日以降のひずみの変動はほぼ同一経路をたどっている。B トンネルに関しても、500 日以降には、ひずみの挙動はほぼ同一の経路をたどっており、乾燥収縮が収束する傾向にあると考えられる。

以上より、覆工コンクリートのひずみ挙動は、コンクリートの温度変化に追随しながら、乾燥収縮等により、徐々に圧縮ひずみが増加していく。本研究において試験施工を行ったトンネルでは、乾燥収縮による影響は、打設から 500 日程度が経過した時点で概ね収束傾向となった。



図一 4 長期の計測結果

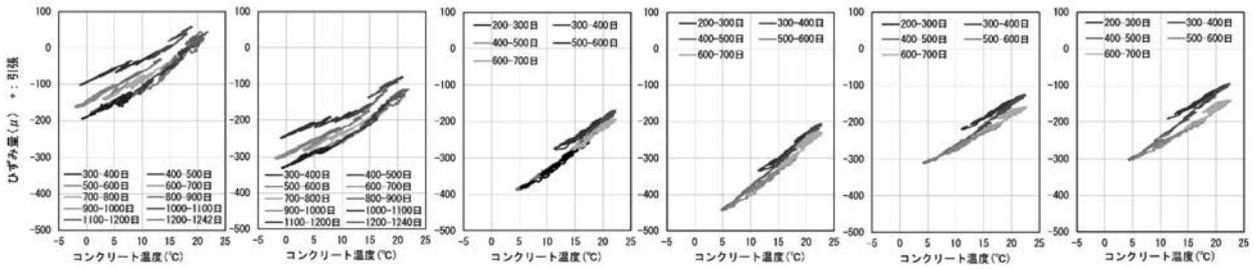


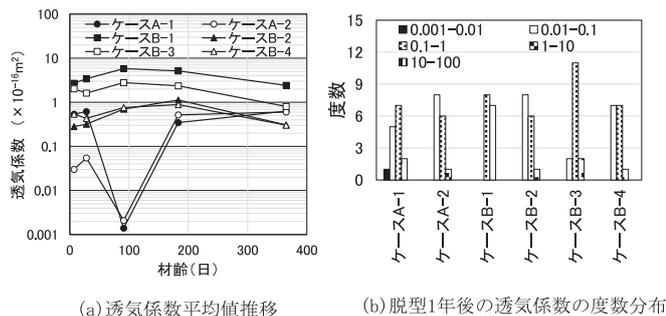
図-5 全計測期間におけるコンクリート温度とひずみ（覆工内側）の関係

(4) 長期的な調査結果

(a) 透気係数・反発硬度試験結果

図-6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方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を見ると、Aトンネルでは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トンネルにおいては、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期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



(a) 透気係数平均値推移 (b) 脱型1年後の透気係数の度数分布
図-6 透気係数試験結果

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。型枠設置期間が42時間の場合は、湿潤養生有無による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の延長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、型枠設置期間の延長によりコンクリート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。

反発硬度試験の結果は、最終的な推定圧縮強度の値も $36.4 \text{ N/mm}^2 \sim 44.5 \text{ N/mm}^2$ の範囲内で設計基準強度以上となっており、各ケースで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結果を図-7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

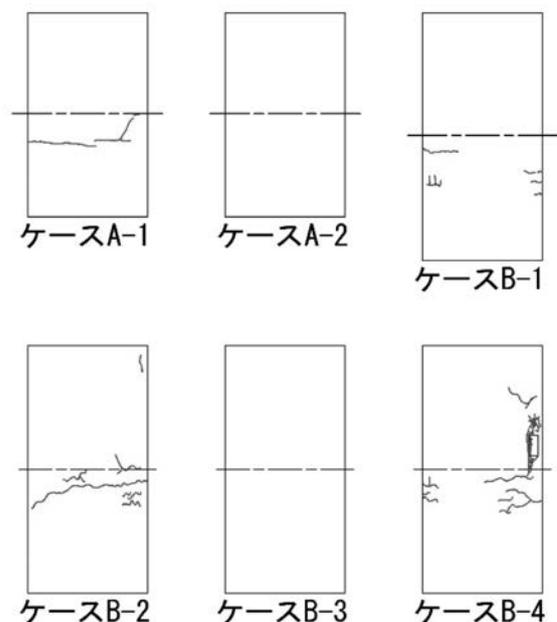


図-7 ひび割れ調査結果

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、通常の型枠設置期間かつ水噴霧のケースであるケース B-3 では変状が確認されず、その他のスパンにおいて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が、検査窓付近の亀甲状のひび割れも確認された。ひび割れの最大幅は、ケース B-2 の天端部における 0.2 ~ 0.4 mm 程度のひび割れであり、その他のスパンは 0.15 mm もしくは 0.1 mm 以下の微小なひび割れである。

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であり、変状の発生時期に関しては、A トンネルは 10 月 ~ 4 月、B トンネルは 1 月 ~ 4 月の期間内に発生しており、両トンネルともに、1 年間の季節変動の中でコンクリート温度が最も低くなる冬期に変状が発生している。

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 0.4 mm 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

本研究にて、型枠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した結果、得られた知見を以下に示す。

- 1) 型枠の脱型時には、覆工の自重の影響により、瞬間的に圧縮側のひずみおよび圧縮応力が増加する。脱型時に発生する圧縮ひずみは 8 ~ 29 μ 程度、圧縮応力は 0.1 ~ 0.3 N/mm² 程度である。
- 2) 型枠設置期間を 40 時間程度以上まで延長すると、脱型時のコンクリート温度が最高温度付近あるいはそれ以降になることから、温度上昇中の 18 時間の場合と比較すると脱型直後のひずみ挙動がやや異なる結果となる。しかし、脱型時の圧縮ひずみの増加量や温度低下に移行した際のひずみの挙動に明確な差異は認められない。また、型枠設置期間を 160 時間まで延長すると、型枠の拘束により引張応力が発生するが、その値は最大 0.72 N/mm² と小さい。
- 3) 長期的な挙動は、コンクリート温度の季節変動に追従しながら乾燥収縮の影響により徐々に圧縮ひ

ずみが増加する。本研究において試験施工を行ったトンネルでは、乾燥収縮による影響は、打設から概ね 500 日程度経過した時点で概ね収束傾向となった。これ以降の全体的なひずみ等の挙動に関して、型枠設置期間の違い等によって、明確な差異は見られない。

- 4) 透気係数は、型枠設置時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。
- 5) 型枠設置期間の延長や養生条件の違いによる覆工表面の変状発生状況について、打設後 1 年経過時点においては、明確な相関は見られなかった。

以上で述べたように、型枠設置期間の違い等と覆工コンクリートに発生する変状との関連性については、現時点では明確な差は見られない結果となった。ただし、うき、はく離、はく落といった利用者の安全性へ影響を及ぼす変状となって顕在化するの長期経過した後と考えられる。そのため、今後も追跡調査を行い、覆工コンクリートの品質への影響について検討を行っていきたい。

JCMMA

《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.

【筆者紹介】

長谷川 慶彦 (はせがわ よしひこ)
(国研)土木研究所
道路技術研究グループ トンネルチーム
専門研究員



森本 智 (もりもと さとし)
(国研)土木研究所
道路技術研究グループ トンネルチーム
主任研究員



日下 敦 (くさか あつし)
(国研)土木研究所
道路技術研究グループ トンネルチーム
首席研究員

