

# 型枠設置期間の違いによる 覆工の力学的挙動に関する一考察

長谷川 慶彦<sup>1</sup>・日下 敦<sup>2</sup>・森本 智<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> 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、覆工コンクリート脱型後の養生方法等について基準類において統一された規定はない。移動式型枠（セントル）の脱型についても、所要のコンクリート強度が得られた時点で行われることが多い。覆工品質の更なる向上の一方策として、型枠設置期間を長くすることにより、養生期間を確保することが効果的となる可能性が考えられた。そのため、型枠設置期間の違いによる覆工コンクリートの挙動や変状発生状況の把握を目的とし、型枠設置期間を一般的な18時間としたケースと160時間としたケースにおいて試験施工を行い、打設直後から約1年間の覆工のひずみ等の基礎データを収集した。

**Key Words:** mountain tunnel, lining concrete, measurement, analysis

## 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て試験施工を行った。型枠の設置期間を変更した覆工コンクリートにおいて、打設後の経過を観察および調査することによって、品質に対する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

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/mm<sup>2</sup>程度）に達した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。

本試験施工では、同一トンネルにおいて表-1に示すように型枠設置期間を一般的な18時間（CASE1）とマスコンクリートにおける標準的な養生期間となる1週間程度を目安とした160時間（CASE2）の2種類のスパンを設けた。両CASEにおいて、覆工コンクリート打設直後から約1年間に渡る観察および計測を行って、覆工コンクリートの品質に関する基礎データを収集した。その際、コンクリートの仕様（鉄筋の有無や配合、添加剤等）や打設方法は一般的なものを使用した。

### (2) 対象トンネルの概要

試験施工を行ったトンネルは、NATMで施工された内空幅約10.7mの2車線の道路トンネルである。試験施

表-1 実施ケース

CASE	トンネル	支保	内空幅	地質	覆工厚	配合	セントルの設置期間(h)	測線
CASE1	A	CⅡ-b	約10.7m	凝灰岩	30cm	30-15-40(N)	18	B
CASE2							160	A, B, C

工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。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 2 スパンを選定した。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/mm<sup>2</sup>、スランプ 15cm、粗骨材の最大寸法 40mm の普通コンクリートである。また、両 CASE ともに脱型後に養生台車による湿潤養生を 1 週間行っている。

### (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約 1 年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、CASE1 ではスパン中央部 (B 断面)、CASE2 では B 断面および A 断面 (既設覆工側)、C 断面 (妻側) にて計測を行った。

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。

## 4. 試験施工結果

### (1) ひび割れ調査

脱型から 1 年後のひび割れ調査の結果を図-2 に示す。CASE1 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たことから、脱型完了から 6 ヶ月~1 年の期間内で発生している。この期間は 10 月~4 月までであり、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。なお、発生している変状はひび割れのみであり、うき・はく離等の変状は確認されていない。一方、CASE2 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なかった。

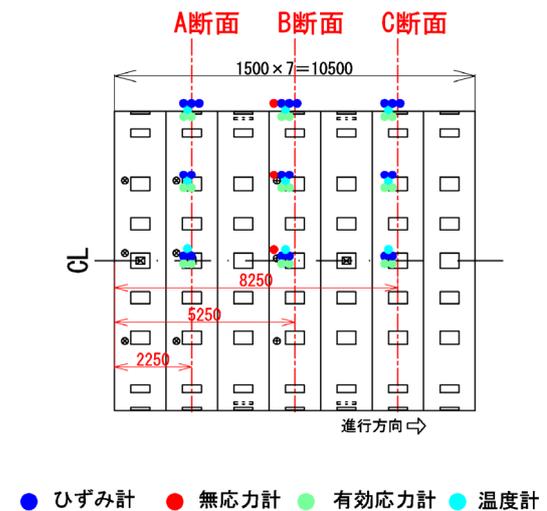
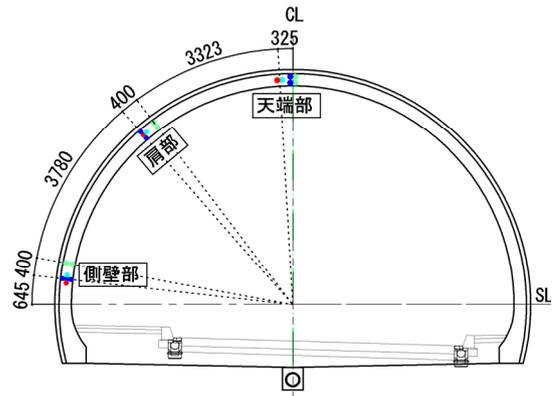


図-1 計測機器配置図

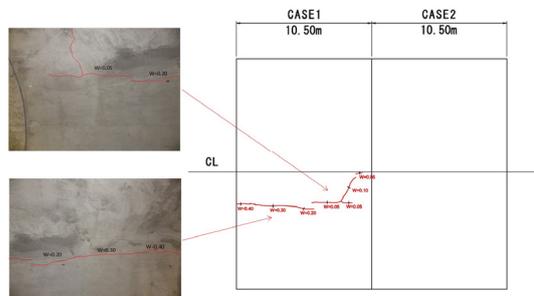


図-2 変状展開図と変状写真

ひび割れの進行性については、現状では不明であるが、ひび割れ幅が 0.4mm 程度と軽微であり、スパンを跨いで発生しているものではないことから、現時点で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。本結果は、コンクリートの施工から 1 年間の調査結果であり、今後、新たな変状の発生や進展等の可能性も考えられる。乾燥収縮や温度伸縮に伴うひび割れは、覆工打設後 3 年から 5 年以内に発生する可能性が高いことが既往の研究により報告されていることから、今後の進展性 (収束状況等) も踏まえて継続して観察していく必要がある。

(2) 若材齢時における計測結果

図-3 および図-4 に打設完了時を初期値とした CASE1, CASE2 における B 断面の天端, 肩部, 側壁部にて計測した 10 日間のひずみ, 無応力ひずみ, コンクリート温度, 応力の推移を示す。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。右縦軸は, 応力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) およびコンクリート温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) を表して

おり, 応力については, 正側が圧縮, 負側が引張である。横軸は経過日数を表している。

CASE1 では, 打設完了後からセメントの水和反応によりコンクリート温度が上昇し, それに伴い引張側 (膨張側) にひずみが増加する。脱型時には, 瞬間的に圧縮側 (収縮側) のひずみが増加するが, コンクリート温度が上昇中であるため, 再度引張ひずみが増加する。その

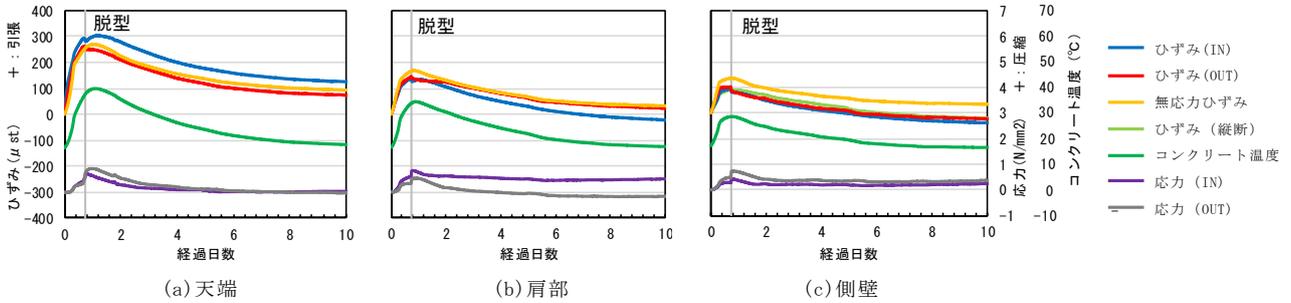


図-3 CASE1 における若材齢時の計測結果

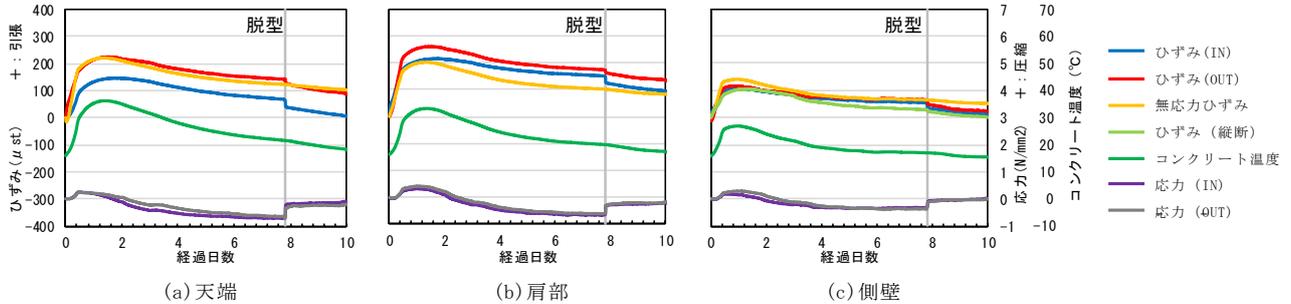


図-4 CASE2 における若材齢時の計測結果

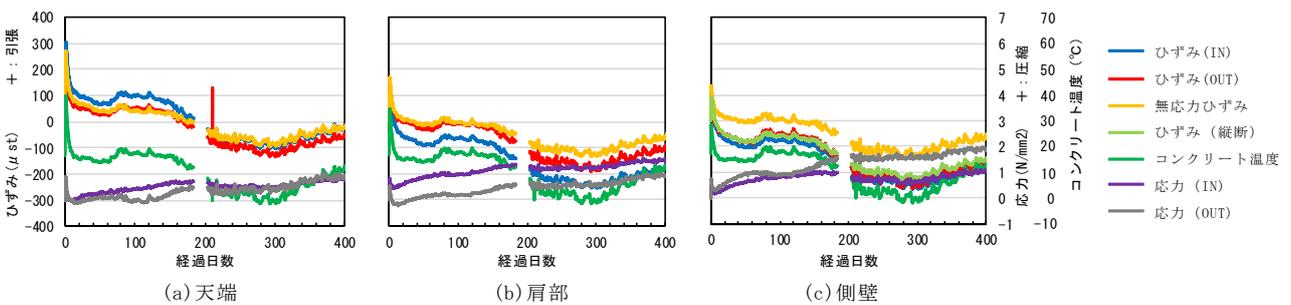


図-5 CASE1 における長期的な計測結果

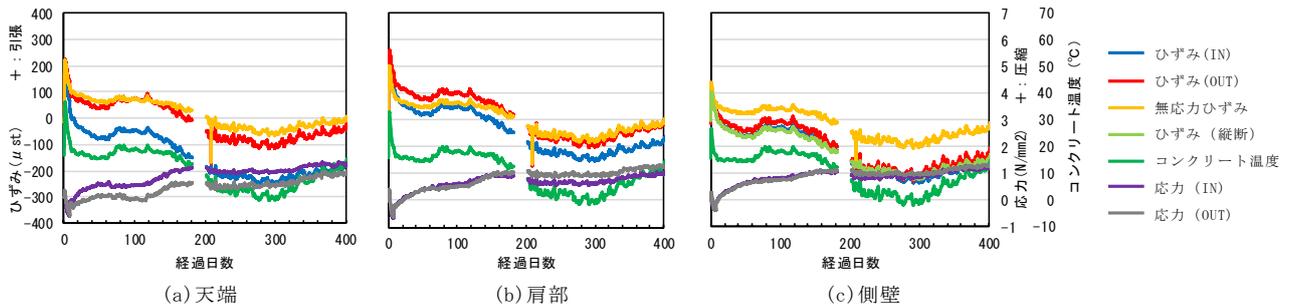


図-6 CASE2 における長期的な計測結果

後、コンクリート温度が低下していくことに伴い、圧縮側にシフトする。無応力ひずみに関しては、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ことから、脱型の影響はなくコンクリート温度と同様の挙動を示している。応力に関しては、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応力が増加した後、肩部の地山側以外は圧縮側の領域内で推移する。

CASE2 においては、打設直後は CASE1 と同様にコンクリート温度の上昇に伴い引張ひずみが発生する。コンクリート温度は型枠設置中に最高温度となり、その後は徐々に低下して、ひずみが圧縮側にシフトする。脱型時のコンクリート温度は 20°C 程度であり、脱型に伴い瞬間的に圧縮側のひずみが増加する。応力に関しては、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<sup>2</sup> 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、型枠からの拘束を受け、引張応力が発生していると考えられる。その後は、脱型時に瞬間的に圧縮側の応力が発生し、10 日経過時点では CASE1 とほとんど差のない値となった。

### (3) 長期的な計測結果

打設完了時を初期値と設定した両 CASE における B 断面の天端、肩部、側壁部にて計測した 400 日間のひずみ、無応力ひずみ、コンクリート温度、応力の推移を図-5、図-6 に示す。

無応力ひずみは、コンクリートの温度変化と同様に推移しながら、徐々に圧縮側に増加する傾向にあり、両 CASE において勾配に大きな差は見られない。計測開始 400 日時点における無応力ひずみの計測値は、最大で CASE1 で 55 $\mu$ 、CASE2 で 31 $\mu$  の圧縮ひずみとなっている。

ひずみに関しても同様の傾向であり、コンクリート温度の変化に追従しながら徐々に圧縮ひずみが増加している。また、覆工の内空側、地山側のひずみ差は、打設後の初期段階の差をある程度保ったまま推移しており、CASE1、CASE2 において大きな違いは見られない。

応力に関しては、計測開始から 400 日経過時点の応力の値は、CASE1、CASE2 において大きな差は見られなかった。また、CASE2 で計測した A 断面、C 断面についても定性的には同様の挙動を示している。

### (4) 透気係数・反発硬度試験結果

図-7(a) に 1 スパンあたり 15 箇所の透気係数試験結果の平均値および表面含水率の平均値と材齢の関係を示す。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

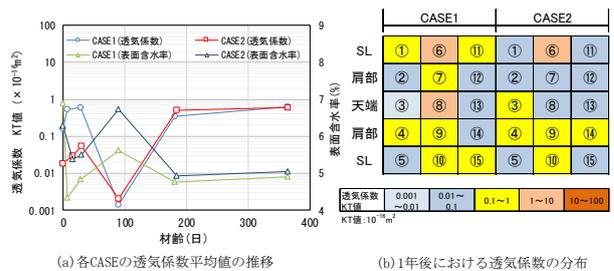


図-7 透気係数試験結果

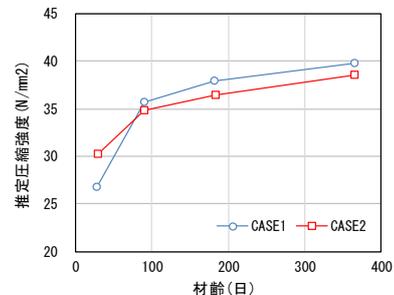


図-8 反発硬度試験結果

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。

透気係数は、脱型後 28 日目程度までは CASE2 の方が小さい値を示しており、型枠設置期間が長い場合、脱型後の初期段階では覆工表面が緻密となる可能性が示唆される。脱型後 3 ヶ月目では、CASE1、CASE2 とともに表面含水率が増加し、透気係数が大きく低下した。透気係数は表面含水率の影響を受けやすいため、表面含水率の変化が透気試験の結果に影響を及ぼした可能性が考えられる。6 ヶ月目以降は両 CASE の透気係数、表面含水率は同等の値を示し、脱型から 1 年後におけるスパン全体の透気係数の平均値は、CASE1 で 0.63 $\times 10^{-16}$ m<sup>2</sup>、CASE2 で 0.60 $\times 10^{-16}$ m<sup>2</sup>であった。

計測最終時点におけるスパン全体の平均値は、両 CASE で大きな差はないが、図-7(b) に示す試験実施地点ごとの透気係数試験結果によると、CASE1 と比較して CASE2 の方がばらつきが少なく、透気係数が小さい部位が多いことが確認できる。これらの結果より、透気係数で評価する場合の表面の緻密さの向上が期待できる可能性が示唆される。

図-8 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、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。打設から 1 年後のスパン全体の平均値は、CASE1 で 39.8N/mm<sup>2</sup>、CASE2 で 38.5N/mm<sup>2</sup> となり、両者で差は見られず、設計基準強度以上の値を示している。

## 5. 骨組み構造解析との比較

### (1) 解析条件

トンネル工事における型枠脱型時期の検討の際に、脱型時に必要なコンクリート強度を解析等により把握することを考え、骨組み構造解析により再現した脱型時の覆工挙動と試験施工により得られた計測結果の比較を行った。解析条件を表-2に示す。解析にあたっては、受働側を線形弾性、主動側の剛性をゼロとする非線形ばねで地山をモデル化し、荷重は覆工の自重のみを与えた。脱型時期の覆工剛性に関しては、現地試験により得られた脱型時期の圧縮強度からヤング係数を算出することで再現した。覆工厚は、設計値は30cmであるが、試験施工スパンのコンクリート巻立空間の計測結果等を参考に35cmとした。

### (2) 解析結果

図-9にCASE1における有効応力計により得られた脱型時の計測結果（応力変化量）と解析結果の比較を、図-10にCASE1におけるひずみ計により得られた脱型時の計測結果（ひずみ変化量）と解析値の比較を示す。また、図-11および図-12にCASE2における同様の比較を示す。解析結果は、解析により得られた曲げモーメントと軸力から計測位置（断面深さ）における応力とひずみを算出したものである。

解析結果では、覆工は全圧縮状態であり、発生応力は天端部の曲げモーメントの影響により内空側が小さく、地山側が大きい傾向にある。また、鉛直方向の作用荷重（覆工の自重）を脚部で支持するため、脚部に発生する応力が大きくなる挙動となり、発生応力はCASE1とCASE2で大きな差はない。ひずみに関しても傾向は同様であるが、CASE2ではコンクリートが硬化していることから、CASE1よりも発生するひずみ量が小さくなる結果となる。

計測値では、CASE1において計測した応力は概ね解析値と同様の値を示している。一方、ひずみに関しては、天端部を除いて解析値よりもやや小さい値を示している。CASE2については、発生応力、ひずみともに計測値の方が解析値よりも大きくなる傾向を示し、天端部で最も発生応力等が大きくなる傾向にある。CASE1の計測結果と比較してもCASE2の発生応力、ひずみの方が大きい値を示し、解析値と一致しない傾向が確認された。これらの違いについては、今後、詳細な検討が必要である。

## 6. おわりに

本研究では、型枠の脱型時期の違いに着目し、脱型時

表-2 解析条件

解析モデル	
覆工モデル	梁要素 線形弾性材料
脚部モデル	ピン固定
地山条件	
変形係数	778MN/m <sup>2</sup> 地質調査による試験結果を参考
地盤反力係数	672MN/m <sup>2</sup> 変形係数から道路橋示方書・同解説（下部構造編）に準拠して算出
覆工コンクリート	
厚さ	35cm 覆工巻厚の実測結果を参考
ポアソン比	0.2
ヤング係数	CASE1 : 4,095N/mm <sup>2</sup> 圧縮強度からコンクリート標準示方書（設計編）に準拠して算出 CASE2 : 18,489N/mm <sup>2</sup>
解析CASE	
CASE1	セトル設置18h
CASE2	セトル設置160h

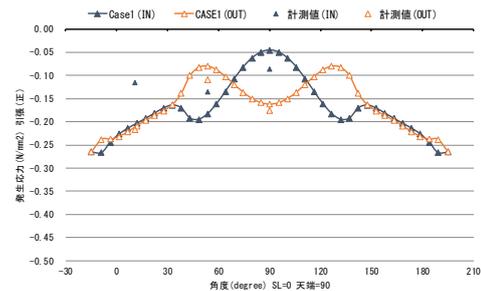


図-9 CASE1における計測応力と解析値の比較

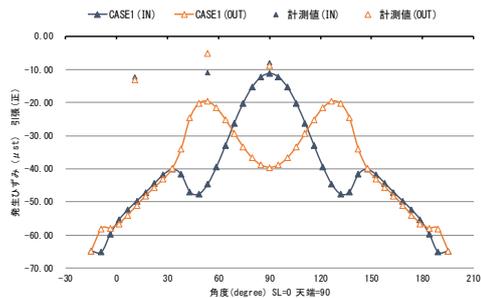


図-10 CASE1における計測ひずみと解析値の比較

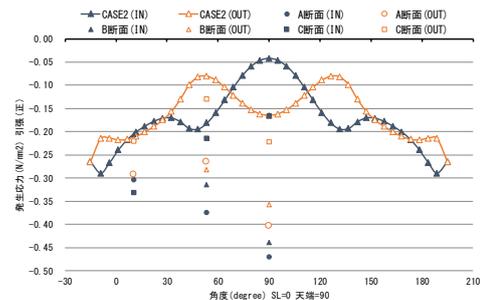


図-11 CASE2における計測応力と解析値の比較

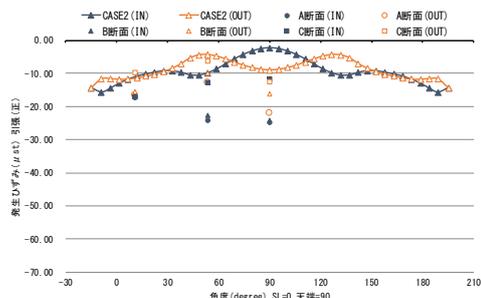


図-12 CASE2における計測ひずみと解析値の比較

間 18 時間 (CASE1) と脱型時間 160 時間 (CASE2) の 2 ケースを設定した試験施工を、それぞれ 1 スパンずつ実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 一般的な脱型時間を確保した CASE1 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 CASE2 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。
- 2) 型枠設置期間の違いにより、若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り、型枠設置期間を長く確保した方がそれらの値は大きくなった。ただし、長期的には、コンクリート温度の変動に追従して徐々に圧縮ひずみが増加する傾向となり、打設から約 1 年経過した時点では CASE1, CASE2 であまり差は見られなかった。
- 3) 透気係数試験の結果、型枠設置期間を長くすることで、脱型後の初期段階における覆工コンクリート表面の緻密性がやや向上する傾向がある可能性が示唆された。ただし、脱型から 1 年経過後におけるスパン全体の平均値には差は見られなかった。
- 4) 反発硬度試験結果から推定される覆工コンクリート

強度に関しては、脱型後の初期段階から 1 年経過後までの間で、両 CASE に大きな差は見られなかった。型枠設置期間の違いによる覆工コンクリートの挙動について、打設から 1 年程度経過時点での計測結果に明確な差は認められないが、今後もひび割れやうき・はく離等の変状の発生状況について追跡調査を行い、脱型時期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) 真下英人, 角湯克典, 森本智：トンネル覆工のひび割れ進展に関する一考察, 土木学会第 62 回年次学術講演会, pp.297-298, 2007.9.
- 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.

(2019. 8. 9 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 field test which two type of curing duration time with lining form (18hours, 160hours) for the purpose of grasping behavior and defects of lining concrete, and collected basic data of lining quality for about one year.