

論文 NATM トンネル覆工コンクリートのひび割れシミュレーションの 施工・点検記録による検証

岩間 慧大*1・細田 暁*2・小宮 隆之*3・宮田 和実*4

要旨: 本研究では、実構造物での計測により検証された数値解析モデルを用いて数値シミュレーションを行い、材料物性値や環境温度等がトンネル覆工コンクリートのひび割れリスクに及ぼす影響を分析した。打込みから 20 日後のひび割れ指数と、点検記録におけるひび割れ発生状況に相関が見られた。釜石市内で冬季に施工された坑口近くのスパンについては、外気温度の入力値が解析結果に大きく影響することを示した。さらに、ヤング係数の低減係数、コンクリートの線膨張係数、自己収縮等の材料物性値がひび割れ指数に及ぼす影響が大きいことを定量的に示し、適切なひび割れリスクを事前に評価するための提案を行った。

キーワード: 覆工コンクリート, 温度応力解析, 施工記録, 点検記録, 外気温度, ひび割れ指数

1. はじめに

東北地方では、地域の復興を推進するための高速道路ネットワークの建設が急速に進められており、その中で 100 を超える NATM トンネルが建設されている。過去に建設された NATM トンネルの中には、多くのひび割れが発生しているものや、施工目地部にうき・はく離・はく落等の第三者被害につながる変状が多く発生しているものがあることが明らかになっている¹⁾。東北地方整備局では、この状況に対して、品質確保システムにおいて、施工の基本事項の遵守をベースに、ひび割れや施工目地部の変状を抑制する取組みが行われている^{2),3)}。

NATM トンネルの 2 次覆工コンクリートのひび割れについては、補修基準や抑制対策が確立されているとは言えない。ひび割れリスクや抑制対策の効果は、設計、施工の段階で、「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」⁴⁾ (以下、「制御指針」と記す) に基づく温度応力解析を用いて評価できる。しかし、2 次覆工コンクリートのひび割れについての数値シミュレーションの検証は十分になされているとは言えない。

本研究では、3 次元有限要素法を用いた数値解析を実

施する。数値解析モデルは、復興道路の実構造物（釜石市内の K トンネル）での計測により検証する。さらに、対象トンネルのひび割れリスクの高いスパンについて、施工時の記録を入力に用いてシミュレーションを行い、点検記録におけるひび割れの調査結果と比較する。施工・点検記録により検証された数値解析モデルを活用して、各種の物性値や環境温度等がひび割れリスクに及ぼす影響を分析する。

2. 数値解析モデルの検証

2.1 数値解析モデルの概要

本研究では、3 次元有限要素法による温度応力解析ソフト ASTEA-MACS (Ver.8.5.6) を用いて、筆者らがこれまで構築してきた NATM トンネル 2 次覆工コンクリートの解析モデル⁵⁾を使用した。ここでは、解析モデルの概要と、既往の文献⁵⁾と異なる入力条件について説明する。解析モデルの全体図を図-1 に示した。

2.2 物性値・境界条件の設定

(1) コンクリート物性値の設定

入力条件のうち、コンクリートや岩盤の物性値については、制御指針に示される設計用値を用いた。ただし、断熱温度上昇量・圧縮強度・線膨張係数・クリープの影響によるヤング係数の低減係数・自己収縮ひずみは実測値を用い、表-1 に示すように設定した。圧縮強度は実材齢で示している。ヤング係数の低減係数は、実構造物に設置した有効応力計と無応力計の計測結果を用いて、適切に設定した時間間隔ごとに算出した低減係数に基づいて設定した⁵⁾。自己収縮ひずみについては、無応力計によるひずみから温度ひずみを差し引いて求めた実測値を元に、材齢 20 日程度での値が同等となるよう、表-1

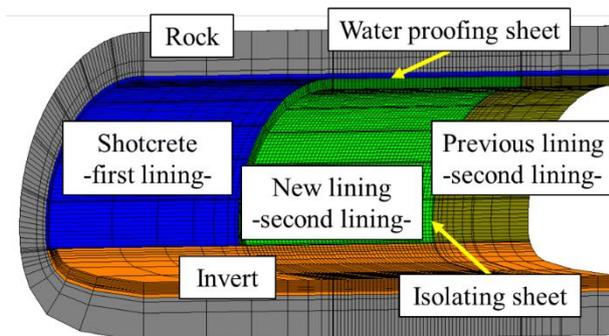


図-1 数値解析モデルの概要図

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府都市地域社会専攻 (学生会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院准教授 博(工) (正会員)

*3 西松建設株式会社 土木事業本部 土木設計部

*4 西松建設株式会社 土木事業本部 土木設計部 (正会員)

表-1 実測値より入力した物性値

| | |
|---|--|
| Adiabatic temperature rise (°C) | $Q(t) = 45.9(1 - e^{-1.191t})$ |
| Compressive Strength (N/mm ²) | 29.7 (after 5 days) 32.1 (after 7 days) 42.7 (after 28 days) 52.5 (after 56 days) |
| Coefficient of thermal expansion (× 10 ⁻⁶ /°C) | 6.21 |
| Reduction coefficient for modulus of elasticity | Temperature rising : 0.88 Temperature decreasing : 0.50 |
| Autogenous shrinkage strain | $\varepsilon_{as}(t_e) = 0.598\varepsilon_{as,\infty}r_{as}(t_e)$ $\varepsilon_{as,\infty} = 2350e^{-5.8W/c} + 80(1 - e^{-1.2 \times 10^{-6}(T_{max}-20)^4})$ $r_{as}(t_e) = 1 - e^{-a_{as}(t_e-t_{e,set})^{b_{as}}}$ $a_{as} = 3.7e^{-6.8W/c}(0.06T_{max} - 0.20)$ $b_{as} = 0.25e^{2.5W/c}(-0.0075T_{max} + 1.15)$ |

に示すように制御指針の自己収縮モデルの 0.6 倍程度に設定した。これは、モデルの検証後に、配合や温度履歴の影響も考慮したパラメトリックスタディを行うためである。

(2) ジョイント要素の設定

本解析モデルでは、吹付けコンクリートと 2 次覆工コンクリートの間に配置される防水シートの力学的影響を、ジョイント要素によりモデル化した。ジョイント要素のモデル化においては、圧縮力は隣接要素に伝達し、引張力と摩擦力には実質的な抵抗をゼロとするように強度や剛性を設定した⁵⁾。

(3) 熱境界条件の設定

図-2 に熱境界条件のモデル化について示す（要素の形状・寸法は実際と異なる）。

トンネル坑内温度は天端に近いほど高くなることが知られている⁹⁾ため、熱伝達境界を S1~S6 に 6 分割し、S1 に比べて S6 では最高温度に 5°C の差が生じるモデルを適用した。

また、実際に施工された NATM トンネルで観察した防水シートの損傷状況を勘案して、天端からインバート接合部までの角度の 1/3 の範囲には、2 次覆工コンクリートの背面に薄い空気の層が存在すると仮定して、防水シートの熱伝導率を 0.0064W/m°C（上部 1/3）、0.246W/m°C（下部 2/3）と設定した⁵⁾。

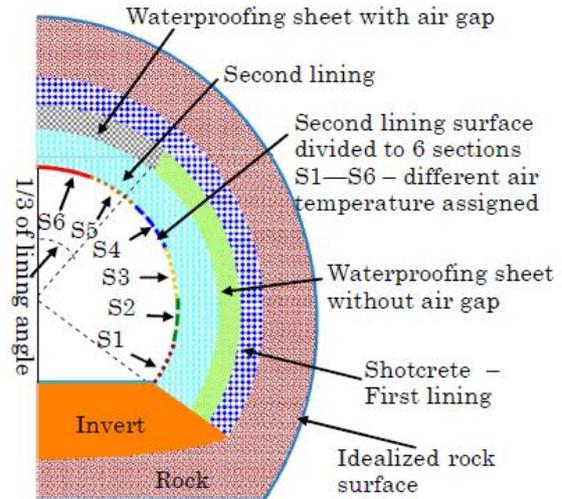


図-2 熱境界条件の設定



図-3 K トンネルにおける養生の状況

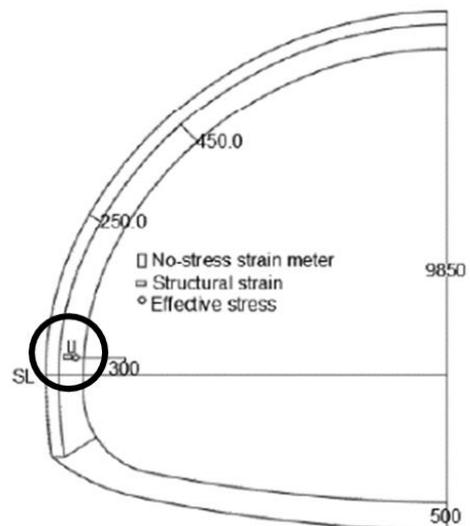


図-4 解析モデルと実構造物の比較検証点

表-2 K トンネルの情報

| Cement type | Unit amount (kg/m ³) | | W/C (%) | Cross section type | Thickness of second lining (mm) |
|-------------|----------------------------------|-------|---------|--------------------|---------------------------------|
| | Cement | Water | | | |
| BB | 340 | 155 | 45.6 | DIII | 450 |

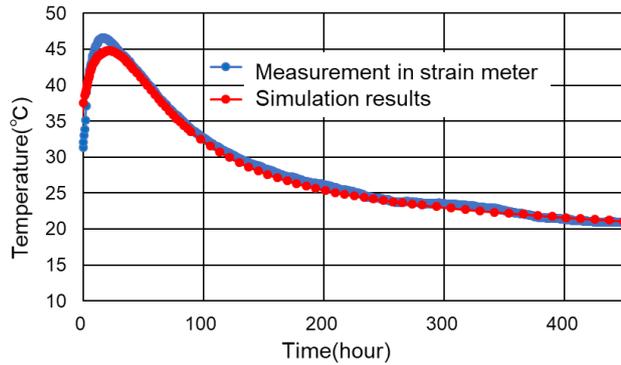


図-5 温度履歴の検証結果

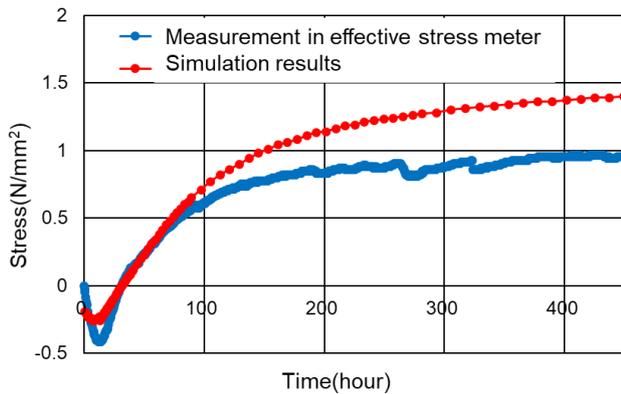


図-6 応力履歴の検証結果

さらに、モデル化に用いた K トンネルでは、脱型直後から図-3 に示すような農業用ビニールシートによる養生を行っている。この養生による保温効果を勘案して、脱型後の熱伝達率を $3\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ として設定した。

2.3 実構造物での計測による検証

(1) 計測点位置と検証部分

図-4 に示すように、実構造物においてスプリングライン（内空断面において上半アーチの始まる線のこと、以下、S.L.と記す）より 300mm 上の位置で、温度・ひずみ・有効応力（有効応力計による）の計測を行った。ひずみと応力の測定方向はトンネル軸方向である。計測結果の整理に際しては、硬化原点 σ_0 をゼロ点として整理した⁹⁾。また、実構造物の条件を表-2 に示す。なお、この現場は中流動コンクリートを用いた品質確保の試行工事の対象であった。現場で測定された情報から、養生シート内の湿度が 90% 以上であったため、本研究での数値解析においては乾燥の影響は考慮していない。

(2) 温度・応力の検証

温度と応力の検証結果を図-5、図-6 に示す。温度履歴については、最高温度とその後の温度低下の挙動が精度良くシミュレーションできている。応力履歴については、温度降下時におけるクリープの影響によるヤング係数の低減係数を一定とした影響等もあり、やや応力を過

表-3 K トンネルのインバート拘束ひび割れ

| Span No. | Condition of cracking at S.L. | |
|----------|---|--------------------------------------|
| | First inspection (2017.02) | Observation by the authors (2017.12) |
| 1 | One longitudinal crack only at tunnel mouth 0.2mm | No crack |
| 2 | 0.2mm | |
| 3 | 0.2mm, 2 cracks | |
| 4 | 0.2mm, 2 cracks | |
| 5 | 0.2mm, 2 cracks | |
| 6 | 0.2mm | |
| 7 | 0.2mm | |
| 8 | No crack | Max 0.1mm |
| 9 | 0.2mm | |
| 10 | 0.2mm | |
| 11 | 0.3mm | |
| 12 | 0.2mm | |
| 13 | 0.3mm | |
| 14 to 24 | No crack | No crack |
| 25 | No crack | Max 0.06mm |
| 26 | 0.2mm | |
| 27 | 0.2mm | |
| 28 | No crack | Max 0.04mm |
| 29 | No crack | Less than 0.04mm |
| 30 | No crack | Less than 0.04mm |

大評価する結果となったが、実構造物でのひび割れリスクを検討するための精度は十分であると考えている。

3. 施工・点検記録を用いた検証

3.1 K トンネルのひび割れ発生状況

ここでは、数値解析モデルの検証のための計測を行った K トンネルにおけるひび割れ発生状況を点検記録およびその後の現地調査結果より確認する。

K トンネルの 2 次覆工コンクリートは、2015 年 6 月から 12 月にかけて施工され、初回点検は 2017 年 2 月に行われている。さらに、筆者らによる現地調査は 2017 年 12 月に、初回点検においてひび割れが無かったスパンを中心に行った。インバートが存在するのはスパン 1~13 およびスパン 25~30 である。さらに、スパン 1 およびスパン 30 が 7.5m、その他が 10.5m で施工されているため、数値解析による検討は、スパン 1 とスパン 30 を除いた

インバートが存在する全スパンにおいて行っている。

インバート拘束によるひび割れの発生状況を表-3 に示す。初回点検において、スパン 1, 8, 14~24, 25, 28~30 はひび割れが発生していなかった。そのおよそ 1 年後の現地調査では、スパン 1 とインバートがない部分を除き、ひび割れが観察されたが、すべて補修を必要としない範疇に収まる小さいものであった。初回点検時に 0.2mm, 0.3mm と記録されたひび割れはすべて、注入工法により補修がなされていた。表-3 に示すように、2017 年 12 月の現地調査で確認したひび割れは、1 本のひび割れにおいても計測箇所でひび割れ幅は異なったが、測定された最大幅でもスパン 8 における 0.1mm であった。計測時期がひび割れ幅の大きくなる冬季であり、今後のひび割れ状況の変化も追跡したいと考えている。

一方で、天端部のひび割れについては、どのスパンにおいても発生していなかった。

3.2 各スパンにおける熱境界条件の設定

K トンネルの各スパンについて、トンネル建設中の施工記録を活用して温度応力解析を行った。気温に関しても、坑外温度とトンネル延長中央における坑内温度が計測されている。ここでは、施工記録に基づいて設定した、表-4 に示す各スパンにおけるコンクリートの打込み温度や気温等の入力値について説明する。

コンクリートの物性値に関しては、表-1 に示したものを各ブロックで共通して用い、打込み温度のみを施工記録に基づいて入力した。現場での地下水の温度が年間 15℃程度で変化していないという観察結果から、岩盤やインバートの温度は 15℃に設定した。また、2 次覆工コンクリート打込み時にすでに存在する吹付けコンクリートやシート類、隣接スパンについては、外気温度の入力値と岩盤温度である 15℃との平均値を入力した。

外気温度に関しては、打込み日の温度と 20 日後（解析終了時）の気温を線形補間して与えた。そして、計測結果から当該地域の夏季においては坑外と坑内の温度差が小さいこと、坑口から 100m 以上奥では坑内温度の変化がほぼ無くなるという知見⁹⁾を考慮し、打込み日および 20 日後の気温として、スパン 2~9 では K トンネルにおける外気温度の計測値、スパン 10~13 では K トンネルにおける坑内温度の計測値を用いた。ただし、冬季施工の坑口に近いスパン 25~29 では、冬季には施工終了に伴い 20 日後の温度計測記録が得られなかったため、打込み日には K トンネルにおける外気温度の計測値、20 日後の外気温度としては、気象庁が観測した釜石市の日平均気温を入力することとした。

3.3 K トンネルの各ブロックでのひび割れ指数

K トンネルの各ブロックで計算されたひび割れ指数と表-3 で示した実構造物でのひび割れ発生状況を比較検

表-4 K トンネルの熱境界条件の設定状況

| Span No. | Concrete initial temperature (°C) | Temperature of previous lining and sheet (°C) | Form removal time (hour) | Air temperature (°C) |
|----------|-----------------------------------|---|--------------------------|----------------------|
| 2 | 26 | 16.5 | 184 | 18.0 to 17.7 |
| 3 | 26 | 17.5 | 40 | 20.0 to 17.5 |
| 4 | 26 | 18 | 20 | 21.0 to 18.3 |
| 5 | 26 | 17.5 | 20 | 20.0 to 19.0 |
| 6 | 25 | 16.5 | 40 | 18.0 to 18.1 |
| 7 | 24 | 16.5 | 20 | 18.0 to 18.1 |
| 8 | 22 | 16.5 | 20 | 18.0 to 18.8 |
| 9 | 25 | 18.8 | 20 | 22.5 to 20.7 |
| 10 | 26 | 19.7 | 20 | 24.4 to 18.5 |
| 11 | 26 | 19.8 | 20 | 24.6 to 17.9 |
| 12 | 26 | 20.4 | 20 | 25.7 to 17.5 |
| 13 | 26 | 19.6 | 20 | 24.2 to 20.2 |
| 25 | 14 | 10.5 | 20 | 6.0 to 9.4 |
| 26 | 16 | 12 | 42 | 9.0 to 9.1 |
| 27 | 17 | 14.5 | 20 | 14.0 to 2.0 |
| 28 | 17 | 14 | 20 | 13.0 to 4.3 |
| 29 | 14 | 12 | 65 | 9.0 to 6.1 |

討する。ひび割れ指数は、解析期間中にひび割れ指数がほぼ最小となる位置（ブロック長さ中央部において、高さ方向にインバート接合部から約 500mm 上方、厚さ方向に表面から約 200mm 内部の位置）で算出されたものである。

図-7 に各スパンにおけるひび割れ指数を示す。初回点検時にひび割れがなかったスパンを青で示している。スパン 2~13（以下、夏季スパンと記す）は 8 月上旬から 9 月上旬、スパン 25~29（以下、冬季スパンと記す）は 11 月中旬から 11 月下旬の施工である。これを見ると、夏季スパンについては、K トンネルの条件において、本研究の解析期間中の最小のひび割れ指数が 1.5 程度が有害なひび割れ発生の境界値であった。

しかし、冬季スパンにおいては、最小のひび割れ指数が 1.5 を上回る場合でもひび割れが発生したブロックが見られた。この理由として、数値解析の環境条件の設定と実際に乖離があるためだと推察した。乖離の要因として、a) 20 日後の日平均気温が他と比べて偶然低い日に当たる場合がある、b) 打込み中のセントル保温により、脱型後の日最低気温の影響が大きくなると同時にコンクリートの最高温度と外気温度の差が大きくなる、という 2 点が考えられた。これらの影響を次項にて検討する。

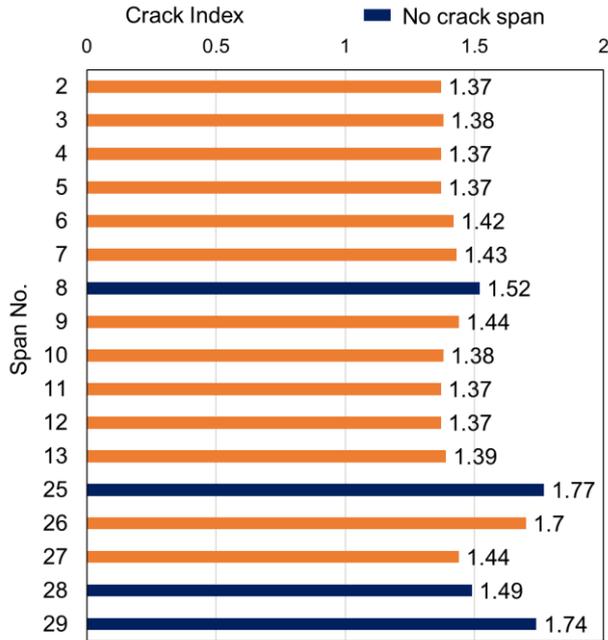


図-7 Kトンネルにおける各スパンのひび割れ指数

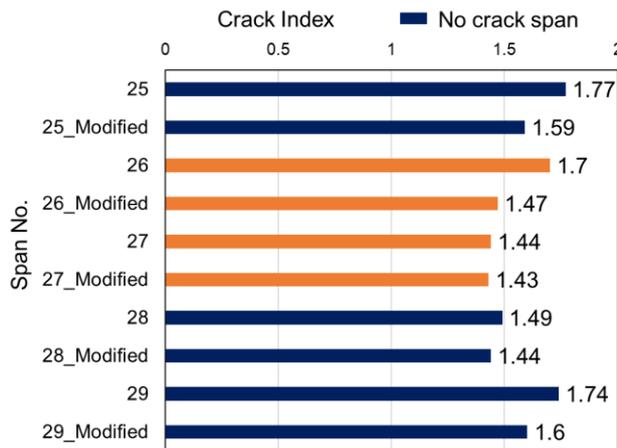


図-8 冬季スパンにおける環境条件の影響の検討結果

3.4 冬季における外気温度の入力値の影響

ここでは、3.3において考察した冬季スパンの環境条件の影響について検討を行う。環境条件として追加で考慮した要因は、a) 外気温度として打込み時から12時間ごとに釜石市における日最高気温と日最低気温を入力する、b) 脱型時間となるまでは、セントル保温の効果として外気温度の入力値を25℃とする、という2点である。

検討結果を図-8に示す。これによると、上記の要因を考慮したモデル(_Modifiedと記載)において、全体的にひび割れ指数が小さくなっている。また、環境条件の影響をより詳細に考慮することにより、冬季スパンにおいても、本研究の条件における点検時点でひび割れが発生していたか否かのひび割れ指数の境界値が1.5程度とすることが分かった。冬季の温度応力解析においては特

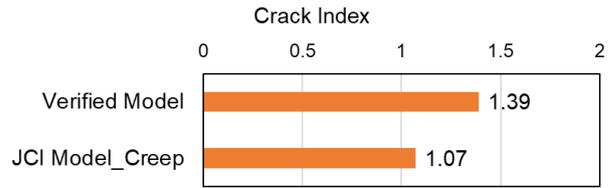


図-9 ヤング係数の低減係数が及ぼす影響

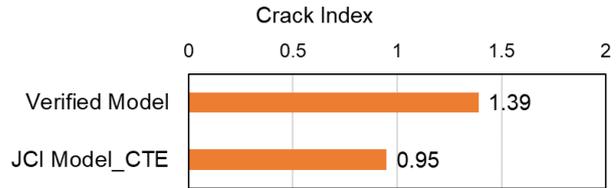


図-10 コンクリートの線膨張係数が及ぼす影響

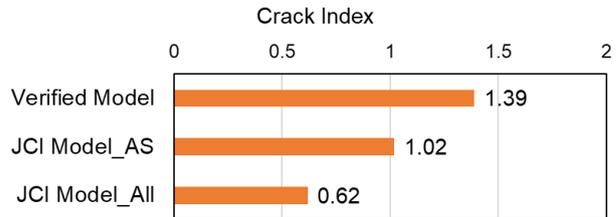


図-11 コンクリートの自己収縮ひずみが及ぼす影響

に、外気温度の入力値の設定には、丁寧な検討が必要になることが示唆されている。

ただし、本研究においては、打込みから20日間の各スパンの数値解析結果と約1年後の実構造物の点検記録を直接比較しているため、打込みから20日後から点検時までの1年間に構造物が受ける温湿度等の様々な影響については考慮していない。打込みから20日後程度までの温度応力と、竣工検査や点検時に確認されたひび割れとの関連性については、今後も検討を重ねる予定である。

4. コンクリートの物性値がひび割れ指数に及ぼす影響

4.1 コンクリートのヤング係数の低減係数の影響

本研究では、実験や実構造物で計測された物性値を活用した解析を行っている。ここでは、コンクリートの物性値がひび割れ指数に及ぼす影響を検討する。

図-9に、制御指針に示されたヤング係数の低減係数(温度上昇時:0.42, 温度降下時:0.65)を用いた場合のひび割れ指数(JCI Model_Creep)を示す。JCI Model_Creepでは、Verified Modelと比べ、コンクリート温度降下時の引張応力が過大評価される結果、ひび割れ指数が1.07と小さくなった。2次覆工コンクリートでは、部材厚や早期脱型の影響等により最高温度に到達する材齢が比較的

早いことが、この差異の一因と考えているが、今後のさらなる検討が必要である。

4.2 コンクリートの線膨張係数の影響

本研究の対象構造物においては、材齢 28 日以降で測定したコンクリートの線膨張係数は、粗骨材に石灰石を用いていたこともあり $6.21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と小さい値であった。線膨張係数は骨材やセメントの種類によって変化する。制御指針には、実測値が無い場合、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの線膨張係数は $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を標準とすると示されている。この設計用値に沿った場合との比較を図-10 に示す (JCI Model_CTE)。

JCI Model_CTE ではひび割れ指数が 0.95 となり、線膨張係数の影響は大きいことが明らかとなった。線膨張係数は比較的簡単に計測できる物性値であるため、施工前に使用材料が決定した段階で測定し、ひび割れリスクの適切な評価に活用することが望ましいと考える。

4.3 コンクリートの自己収縮ひずみの影響

本研究では、実構造物での無応力計での計測結果に基づいた自己収縮ひずみモデルを使用した。表-1 に示したように、制御指針のモデルの約 0.6 倍の自己収縮を用いた。この影響を示したものが図-11 である。本研究の対象構造物に使われたコンクリートは、比較的自己収縮が小さく、制御指針のモデル (JCI Model_AS) による計算結果との差は無視できる大きさではない。コンクリートの自己収縮のばらつきは十分に研究されているとはいえないが、構造物のひび割れリスクへの影響が大きいことを勘案すれば、建設前に自己収縮を計測することがひび割れリスクの適切な評価につながると考える。

最後に、ここまで検討した 3 つの物性値をすべて制御指針に沿った場合 (JCI Model_All) を示す。ひび割れ指数は 0.62 となり、実構造物との乖離が大きいことが分かった。ひび割れリスクの適切な事前評価が建設時の適切なひび割れ抑制対策につながるため、合理的なひび割れリスクの事前評価方法と、それに基づく適切なひび割れ抑制対策を講じることが可能なシステムの構築が期待される。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 材料の物性値や実施工の条件を得られた範囲で入力した数値シミュレーションによる打込み後 20 日時点でのひび割れ指数と、点検記録のひび割れ発生状況との間に相関が認められた。

- (2) 冬季に施工されたスパンにおいて、外気温度を 12 時間ごとに最高温度と最低温度を入力することにより、脱型直後にコンクリートが冷却されることでひび割れ指数が減少し、点検記録との整合性が向上した。
- (3) 計測された物性値等を活用した本研究の解析モデルと制御指針の設計用値に沿ったモデルとでは、計算されたひび割れ指数に大きな乖離が認められた。ひび割れリスクを建設前に適切に評価するためには、コンクリートの線膨張係数や自己収縮等の物性値を把握する必要があると言える。

謝辞：本研究は、科学研究費助成事業「地域ごとの環境作用を考慮したコンクリート構造物の耐久性確保システムの構築と実装」(研究代表者：細田 暁)により実施しました。感謝いたします。

参考文献

- 1) 岩間慧大, 細田暁: NATM トンネル覆工コンクリートの変状に関する点検データの分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1501-1506, 2016.7
- 2) 佐藤和徳: 東北地方の劣化状態を踏まえた復興道路事業におけるコンクリート構造物の品質および耐久性確保の実践的研究, 博士論文, 2017.3
- 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), 2016.3
- 4) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 2016.11
- 5) Chamila, K. R., Hosoda, A. and Iwama, K.: Modeling and Verification of Early Age Thermal Stress in Second Lining Concrete of NATM tunnels, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.15, pp.213-226, 2017.6
- 6) 中村明彦, 國近光生, 亀谷英樹, 中村秀明: 覆工コンクリートの初期ひびわれ予測における熱特性値の同定とひびわれ解析, 土木学会論文集 F1, Vol.71, No.3, pp.I1-I16, 2014
- 7) 臼井達哉, 宮原茂禎, 丸屋剛, 大友健: 異なる温度条件下における高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみと収縮応力の特性, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.1, pp.92-103, 2014
- 8) 西川純一: トンネルにおける温度測定とその解析, 土木研究所月報(北海道開発土木研究所), No.417, 1988.2