

トンネル覆工コンクリートの長期耐久性に関する検討

西脇 敬一*1・松岡 茂*2・川又 篤*3

概 要

最近、トンネルの覆工コンクリートでは、品質の向上を目的に様々な養生が行われている。しかしながら、覆工コンクリートは、ひび割れの発生メカニズムについての知見が少なく、養生の効果を定量的に評価した報告はほとんどない。そこで、覆工コンクリートの長期耐久性をコンクリート片の剥落に対する防止性能と捉え、養生や材料分離が覆工コンクリートのひび割れの発生と進展に及ぼす影響を把握することを目的として、解析による検討を行った。

検討の結果、養生方法の違いは、覆工コンクリートのひび割れの発生と進展に及ぼす影響が小さいことが判った。一方、材料分離の発生は、局所的にひび割れを引き起こし、覆工コンクリートの長期耐久性を低下させる危険性があることを明らかとした。

キーワード：覆工コンクリート・耐久性・ひび割れ・養生・材料分離

STUDY OF THE LONG-TERM DURABILITY OF TUNNEL LINING CONCRETE

Keiichi NISHIWAKI *1, Shigeru MATSUOKA *2, Atsushi KAWAMATA *3

Abstract

Recently, various types of curing have been used for tunnel lining concrete in order to improve quality. Regarding lining concrete, however, there has been little knowledge about the crack generation mechanism and few reports have been made that quantitatively evaluate the effect of curing. Accordingly, we have considered long-term durability of lining concrete as the performance to prevent concrete flaking and conducted an analytic study for gaining an understanding of the effect of curing and segregation on generation and progress of cracks in lining concrete.

As a result, it has been found that differences in the method of curing have only a minor effect on generation and progress of cracks in lining concrete. Meanwhile, generation of segregation has proven to have a risk of causing local cracking and deterioration of long-term durability.

Keywords: lining concrete, durability, cracking, curing, segregation

*1 Material Group, Research and Development Center, Construction Technology General Center

*2 Deputy Executive General Manager, Civil Engineering Division

*3 Architectural Department, Architectural Division

トンネル覆工コンクリートの長期耐久性に関する検討

西脇 敬一*1・松岡 茂*2・川又 篤*3

1. はじめに

従来、トンネルの覆工コンクリート（以下：覆工と称す）は、坑内温度が安定し、かつ湿度が高い状態にあると考えられていたため、打設翌日に脱型した後は付加的な養生を行っていなかった。しかしながら、最近では、施工環境の改善の目的で換気設備が大型化され、坑内温度・湿度が季節によって変動することが明らかになっている¹⁾。そのような中、覆工の品質向上を目的として、様々な養生方法が提案されている。しかしながら、覆工のひび割れの発生メカニズムについての知見が少なく、かつ長期耐久性を確保するために必要な要求性能が明確化されていないため、養生効果を定量的に評価した報告はほとんどない。また、検証した調査報告の多くは、室内試験での結果であるため、実際の覆工での養生効果については不明瞭である。

打設時のコンクリート温度と覆工のひび割れ発生の関係を調査した報告²⁾では、コンクリート温度が25℃以上になると、覆工にひび割れが発生する頻度が高くなり、コンクリート温度が20℃以下の場合には、ひび割れの発生頻度が極端に小さくなっている。この調査結果より、覆工のひび割れは、覆工内部の温度履歴が大きく影響しているものと想定されるが、内部の温度履歴の影響を考慮した検討はほとんど実施されていない。

一方、覆工の打込みについては、セントルに設けられた打設口や検査窓から行われるが、天端部では1箇所の打設口からコンクリートを流動させて充填を行っているのが実情であり、材料分離の発生が懸念される。

そこで、今回、セメントの水和反応や季節変動によって生じる温度ひずみ、および覆工内面からの水分逸散によって生じる乾燥収縮ひずみの経時変化を解析し、覆工のひび割れの発生・進展に対する養生および材料分離の影響の試算を行った。また、覆工の長期耐久性をコンクリート片の剥落の防止性能と捉え、これらの結果から、養生および材料分離が、剥落を引き起こす可能性のあるひび割れに及ぼす影響を検討した。本稿では、これらの結果について報告する。

2. 覆工のひび割れ発生・進展解析

2.1 耐久性指標としてのひび割れ

覆工は、坑口部などの特殊部分を除いて、軸力が卓越する無筋コンクリートのアーチ構造である。したがって、覆工の耐久性の検討では、鉄筋コンクリート構造物の耐久性のように、鋼材の腐食因子の浸入に影響を及ぼすコンクリートの緻密性に関する指標を適用することは適切でないと判断される。

一方、覆工からコンクリート片の剥落が生じた場合は、トンネル内の交通を阻害するだけでなく、第三者を巻き込む重大事故の発生も懸念される。つまり、コンクリート片の剥落は、トンネルの安全な供用を阻害することから、トンネルの長期耐久性を低下させるものと考えられる。このことから、覆工の長期耐久性の検討では、コンクリート片の剥落を引き起こす要因となるひび割れを評価指標として取り扱うことが一般的になるものと考えられる。そこで、本稿では、ひび割れ発生・進展を解析して把握することで、覆工の長期耐久性を検討するものとした。

*1 建設技術総合センター 研究開発センター 材料グループ

*2 土木本部 副本部長

*3 建築本部 建築部

2. 2 解析

(1) 計算モデル概要

文献²⁾では、打設時のコンクリート温度とひび割れ発生本数の関係を整理し、**図-1**に示すようにコンクリート温度 20°Cを境界にひび割れ発生頻度が変化していることを報告している。また、ひび割れは、脱型直後の点検では発見されず、竣工検査前の点検時に発見されたことから、打設後ある程度の時間が経過して生じたものと推定された。

以上の事象から覆工に生じるひび割れは、セメントの水和反応や季節変動によって生じる温度ひずみとコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化の影響を受けると判断できる。コンクリートの収縮ひずみは、水分逸散による体積変化と温度変化に依存していることが知られている。したがって、覆工のひび割れ発生・進展を追跡するためには、セメントの水和反応から水分逸散および温度変化による体積変化を考慮し、かつ水和反応による強度物性の変化を算定できる計算モデルが不可欠である。前川ら³⁾および石田ら⁴⁾は、セメントの水和反応や表面からの水分逸散等のコンクリート内部の水分の変動が計算できるモデルを提案している。このモデルを用いると、コンクリートの配合に基づいて、各種環境下での強度や収縮ひずみ等の物性値の経時変化を算定することが可能である。

そこで、石田らの計算モデルで覆工の物性値の経時変化を計算した。さらに、この物性値の経時変化を入力パラメータとして、覆工全体に発生する応力状態の経時変化を、三次元の有限要素法を用いて計算した。また、応力状態の経時変化の解析では、ひび割れ発生・進展を追跡するために、コンクリートの引張軟化挙動を考慮することができる解析モデルを使用した⁶⁾。

図-2に石田らの計算モデルの解析フローを示す。解析では、季節によってトンネル坑内の環境（温度、湿度）を変動させ、コンクリート内の水分は、地山側へは移動しないものと仮定した。その結果、コンクリート内部の水分は、

内空側のみしか移動せず、内部の熱は地山側と内空側に移動することになり、コンクリートの物性値の経時変化は、**図-3**に示すように1次元の計算モデルで計算できる。

(2) 入力パラメータ

コンクリートの物性値は、環境条件の影響を受け、特に、初期材齢における養生条件の影響が大きいことが知られている。そこで、実際のトンネル施工で行われている養生方法を想定し、**表-1**に示す養生条件を設定した。

表-1の養生条件は、通常の養生方法と一般的に長期耐久性の向上に効果的と考えられている

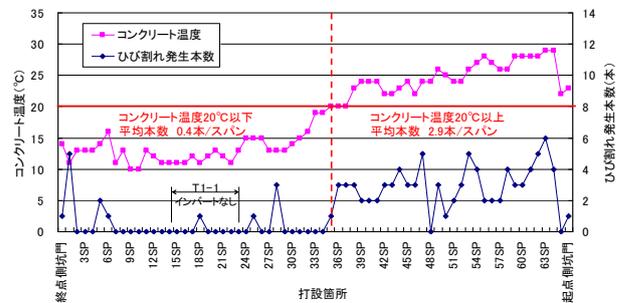


図-1 コンクリート温度とひび割れ発生本数の関係²⁾

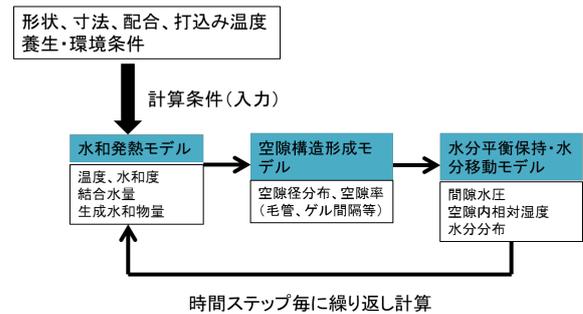


図-2 解析のフロー

水分移動に関するモデルと境界条件

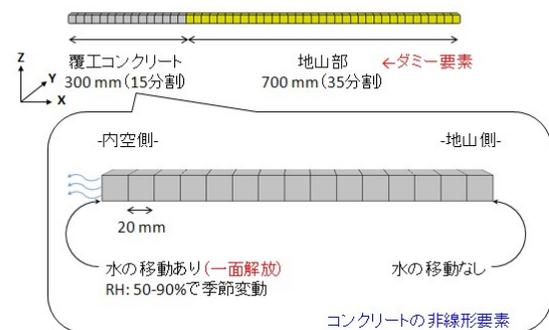


図-3 計算モデル(水分移動)

る養生方法をモデル化したものである。技術提案などでは、脱型する時期や脱型後の養生期間が長期になるほど覆工の長期耐久性の向上に効果があると判定される場合が多いと考えられ、養生の効果が定量的に評価されていないにも関わらず、過大な養生を提案している可能性もある。

なお、覆工の打設時期は、コンクリート温度が25℃以上となる“夏季”と設定した。

(3) 計算結果

覆工内空側の表面部分の収縮ひずみの経時変化を図-4に示す。長期的には、収縮ひずみは脱型後の養生条件に関係なく、坑内の季節変動に追従して変動している。脱型直後は、養生による収縮ひずみの差異はあるが、脱型後6ヶ月以上経過すると養生の影響は、ほとんどなくなっている。このような傾向は、室内試験においてトンネルの養生状態を再現し、養生効果を検証した水野ら⁷⁾の研究報告でも得られている。水野らの試験は、今回の計算条件と同様に表-2のような条件下でコンクリート供試体を静置し、収縮ひずみや強度発現などを測定したものである。その結果においても、養生条件によって収縮ひずみ等の物性値の相違がみられるのは、材齢3ヶ月程度であり、その後は相違がみられないことが報告されている。

前述の計算結果から、図-5に示す収縮ひずみと強度発現等の物性値の経時変化を入力値として、覆工を三次元にモデル化した計算モデルでひび割れ発生・進展を解析した。その結果を図-6に示す。解析結果は、いずれの養生方法も材齢100日の時点で、インバートの拘束によって側壁部にひび割れが発生している。また、材齢200日では、天端部に微細なひび割れの発生が確認できる。ただし、その後は、材齢5.5年時も材齢200日と同程度のひび割れ発生に止どまり、大きな進展は表れていない。

これより、養生方法の違いは、覆工のひび割れの発生および進展に及ぼす影響は小さいと考えられる。しかしながら、ひび割れの発生時期

は、収縮ひずみの発現時期の影響を受けるため、養生方法によって異なることが考えられる。

表-1 養生条件

養生	養生内容	
A	通常	18時間脱型
C	脱型時期延長	72時間脱型
H	封緘養生	18時間脱型後 →封緘養生開始 →7日間で養生終了

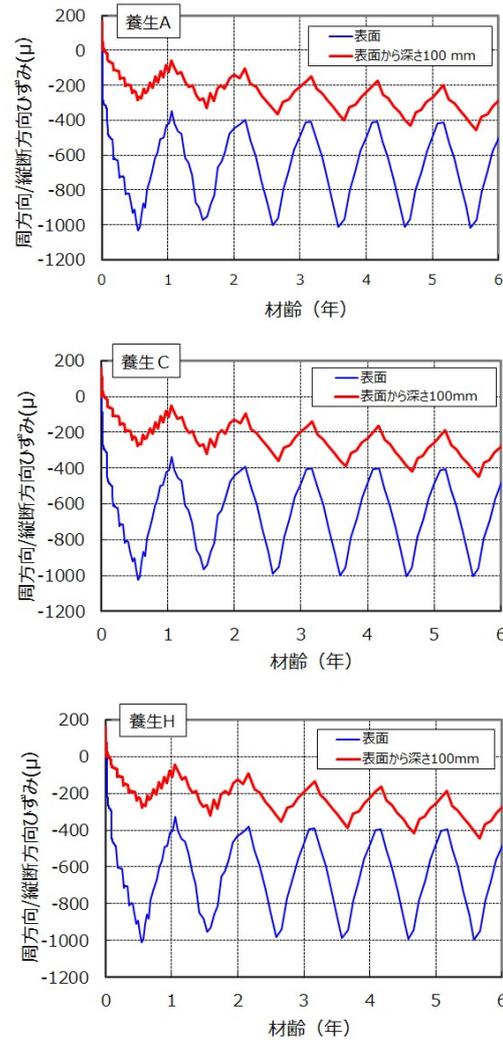


図-4 表層部分の収縮ひずみの経時変化 (上:養生 A, 中:養生 C, 下:養生 H)

表-2 水野らの養生条件⁷⁾

養生	種別	養生内容 (下記以後は、20℃湿度60%で養生)
A	無養生	18時間脱型
B	脱型時期	48時間脱型
C		72時間脱型
D	湿度80%	18時間脱型後 →8hr後に湿度80%養生 →7日間で養生終了
E	水中	18時間脱型後 →直後水中養生開始 →28日間で養生終了
F	水中	18時間脱型後 →8hr後に水中養生開始 →7日間で養生終了
G	水中	18時間脱型後 →8hr後に水中養生開始 →28日間で養生終了
H	封緘	18時間脱型後 →封緘養生開始 →7日間で養生終了
I	収縮低減剤塗布	18時間脱型後 →塗布

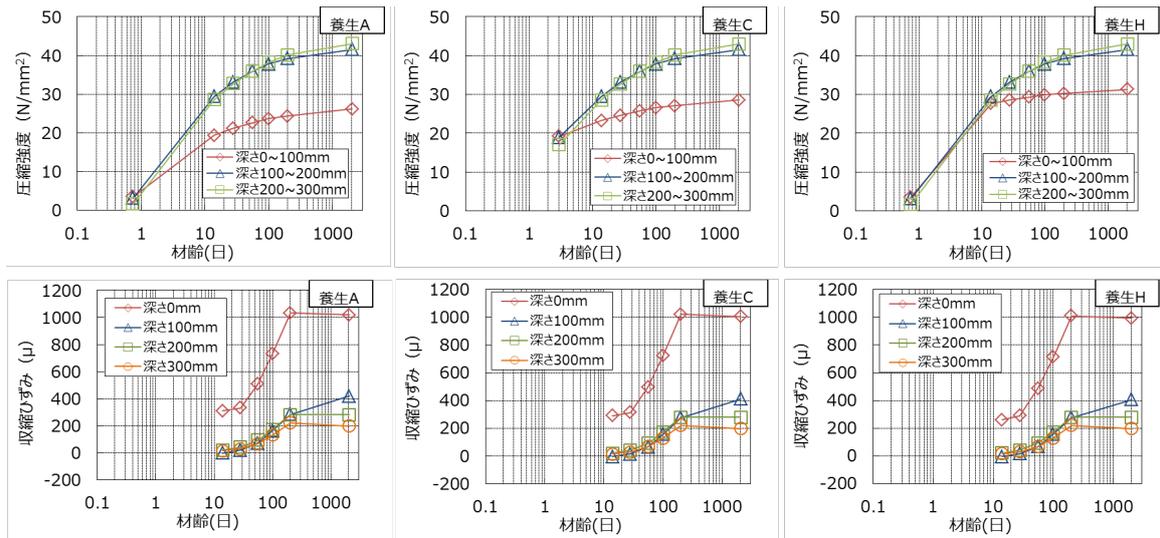


図-5 コンクリートの物性値の経時変化

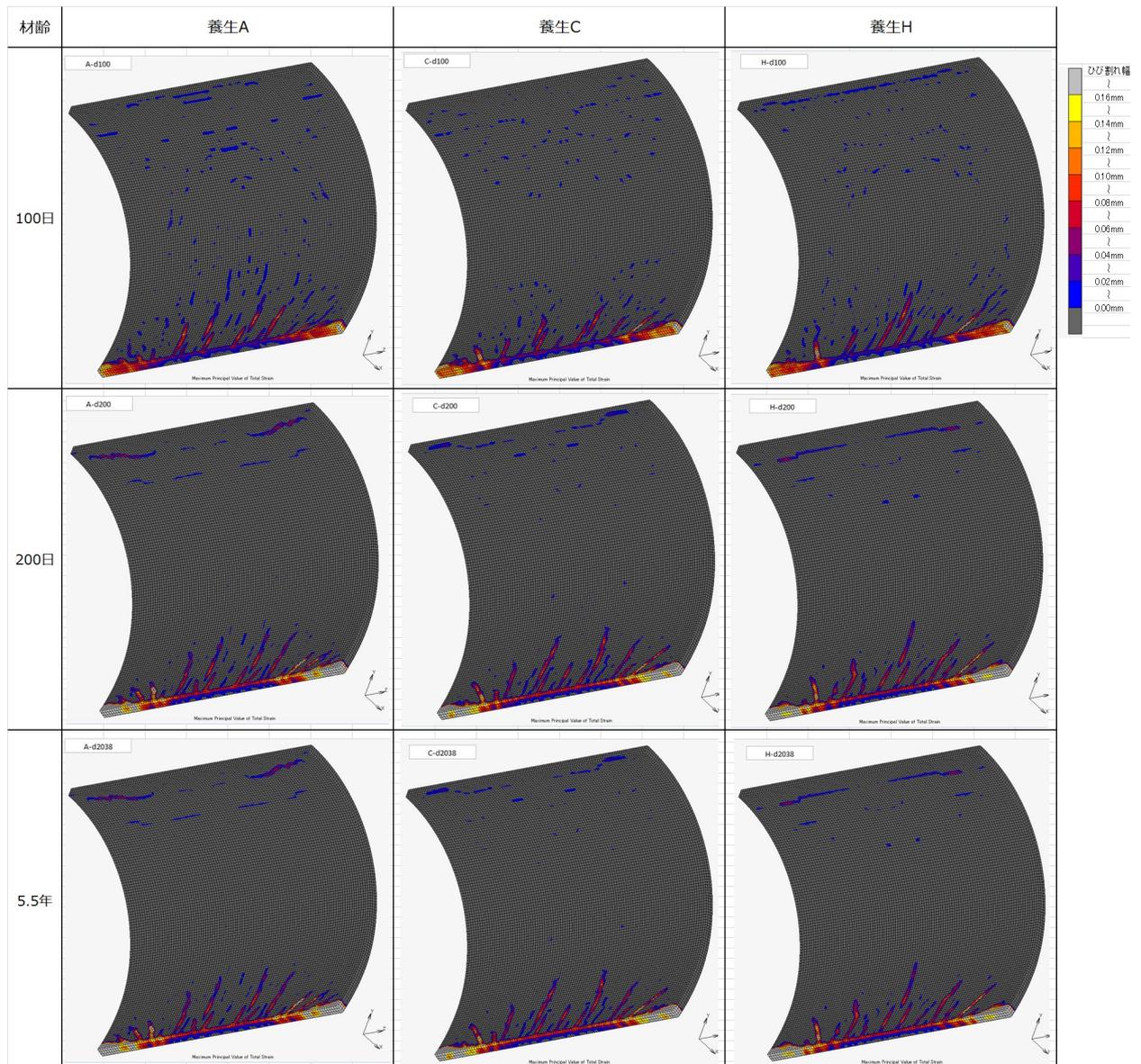


図-6 養生の違いによる覆工のひび割れの発生と進展の差異

3. 施工に起因するひび割れ

覆工の施工では、締固めを確実に実施してセントル内にコンクリートを充填することが求められる。しかしながら、材料分離を引き起こすような過剰な締固めや振動によってコンクリートを横移動させることは避けるべきであることがコンクリート標準示方書に記載されている。

トンネルのセントルは、工程等の関係から長さが 10.5m 程度であり、天端部に打設口を 1 箇所設置するのが標準的である。したがって、天端部の施工では、コンクリートを横移動させているのが実情であり、材料分離の発生が懸念される。研究例が少ないが、材料分離による長期耐久性への影響については、水野ら⁷⁾が粗骨材変動率と収縮ひずみとの関係を報告している。水野らの報告によると、図-7に示すような粗骨材量と収縮ひずみとの間には強い相関があることが示されている。そこで、材料分離が覆工のひび割れ発生・進展に及ぼす影響を数値解析により検討を行った。

材料分離は、単位粗骨材量で定義し、標準配合から-50%、-100%となった場合を想定した。材料分離の設定領域は、図-8に示すように側壁部に粗骨材が沈降することが考えられるアーチ肩部とした。材料分離の発生領域における収縮ひずみは、図-7に示す水野らの粗骨材変動率と収縮ひずみの関係にもとづいて算出した。また、他の計算条件は、前述の2章と同様とした。解析結果を図-9に示す。

材料分離領域では、収縮ひずみが増大するため、局所的にひび割れが発生していることが確認できた。ひび割れは、セメントの水和反応と季節変動によって温度ひずみが増加し、また、コンクリート内部の水分逸散による収縮ひずみが顕著になる時期である打設後 100 日から 200 日程度で確認された。

したがって、材料分離が生じた場合は、施工直後にひび割れはみられないが、竣工検査時あるいは竣工後にひび割れが発見されることが考えられる。また、ひび割れの進展方向は、材料

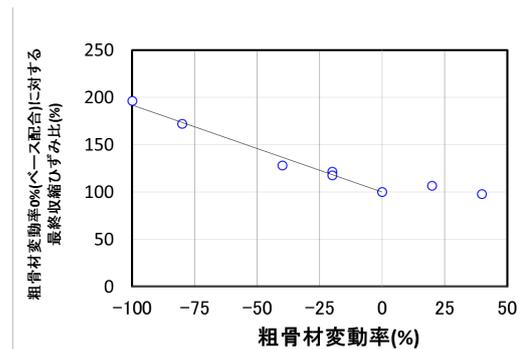


図-7 粗骨材変動率と収縮ひずみの関係⁷⁾

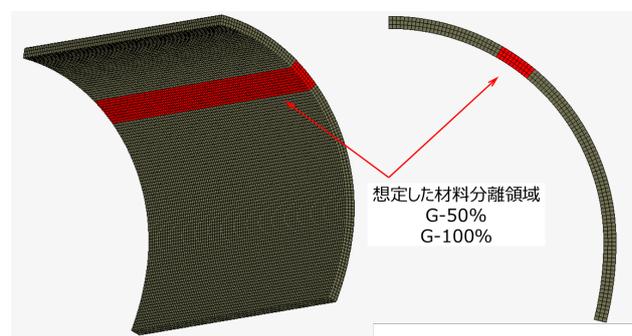


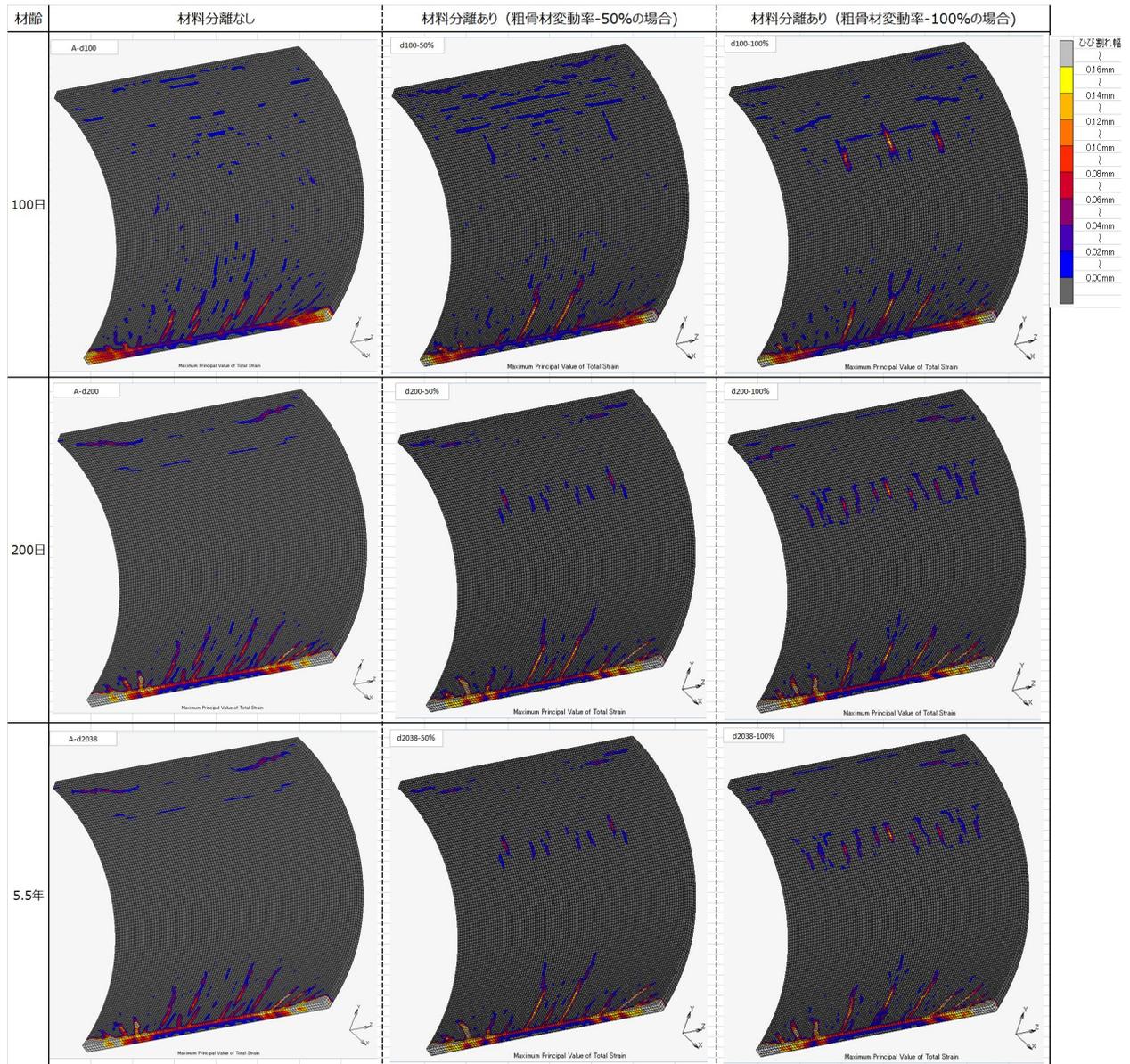
図-8 材料分離の設定領域

分離が生じた領域に依存し、トンネル軸方向に対して斜行することも想定される。このため、材料分離によるひび割れは、コンクリート片の剥落を引き起こす要因となる可能性があると考えられる。

4. まとめ

覆工の長期耐久性を検討する目的で数値解析を行った。本報告では、覆工は軸力が卓越する無筋コンクリート構造であることから、鉄筋コンクリート構造の耐久性を評価する鋼材の腐食や腐食因子の浸入でなく、ひび割れ発生・進展で覆工の長期耐久性を検討した。検討結果をまとめると以下のようなになる。

- ・乾燥収縮などのコンクリートの収縮ひずみに起因するひび割れは、打設後 100 日から 200 日程度経過した時点で発生する。その後は、打設後 5.5 年時も同程度のひび割れであり、大きな進展はみられない。



図－9 材料分離による覆工のひび割れの発生と進展への影響

- ・ コンクリートの収縮ひずみによるひび割れ発生・進展は、脱型時期や脱型後の養生の有無に依存しない。
- ・ 材料分離の領域では、局部的にひび割れが発生し、その発生方向は、トンネル軸方向に対して斜行することも考えられる。このため、材料分離によるひび割れは、コンクリート片の剥落を引き起こす要因となり、覆工の長期耐久性を低下させる危険性がある。

謝辞

本検討は、日本トンネル技術協会「覆工コンク

リートの長期耐久性に関する検討委員会」で実施した解析結果の一部を取りまとめたものである。

解析を遂行するに当たりご指導をいただきました、東京大学の石田哲也教授、(株)コムスエンジニアリングの土屋智史博士には、厚く御礼申し上げます。また、本検討を実施するにあたり、首都大学東京の西村和夫教授、(株)高速道路総合技術研究所の八木弘博士、岩尾哲也氏、水野希典氏、増田弘明氏をはじめ委員会の関係各位には、多数のご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 馬場弘二, 伊藤哲男, 城間博通, 宮野一也, 中島浩, 谷口裕史: 施工中のトンネル坑内環境と覆工コンクリートの湿度変化に関する研究, 土木学会論文集 No.742/VI-60, pp.27-35, 2003.9
- 2) 川又篤, 松岡茂, 窪田賢司: 山岳トンネル覆工コンクリートのひび割れ発生パターン, 土木学会年次学術講演会概要集, III-086, pp.171-172, 2012.9
- 3) Maekawa, K., Chaube, R. and Kishi, T.: Modelling of Concrete Performance Hydration, Microstructure Formation and Transport, E & FN SPON, 1999.
- 4) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural, Taylor and Francis, 2008
- 5) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale Modeling of Concrete Performance-Integrated Material and Structural Mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.2, pp.91-126, 2003
- 6) 渡辺忠朋, 松岡茂, 武田康司: 破壊力学に基づく RC 部材のせん断耐力の検討, 土木学会論文集 V, 592 号, V-39, pp.25-36, 1998.5
- 7) 水野希典, 八木弘, 岩尾哲也, 松岡茂, 西村和夫: 覆工コンクリートのひびわれ抑制による長期健全性向上に向けた実験的検証, 第 25 回トンネル工学研究発表会 2015 講演集, 論文部門 I -2, 2015.11