マルチスケール統合モデルによる
覆工コンクリートの若材齢ひび割れ解析と影響因子の定量評価

東京大学大学院　学生会員　○田辺　詩織
東京大学大学院　正会員　石田　哲也
株式会社コムスエンジニアリング　正会員　土屋　智史

1. 目的

NATM トンネルにおける二次覆工コンクリートは，一般に構造部材としての機能を期待しないことが多いため，他の構造物と比べて品質が重要視されてこなかった．しかし，近年の耐久性に関わる関心の高まりに伴い，トンネルに発生する変状の中で最も報告件数の多い覆工コンクリートのひび割れを減少させ，品質向上を図ることが技術的課題として重要となっている．このような背景を踏まえ，本研究は，岩盤の安定性が一次支保で担保されるという条件の下，覆工コンクリートの材料や施工方法の相違と温度・収縮に起因するひび割れ発生・進展の関連について，マルチスケール統合解析システム 1)を用いて検証することを目的とした．

2. 入力条件

解析を行うにあたって，表 1 に示すように，様々な感度解析と既往の知見に基づき条件を設定した．

3. 実際のデータとの比較

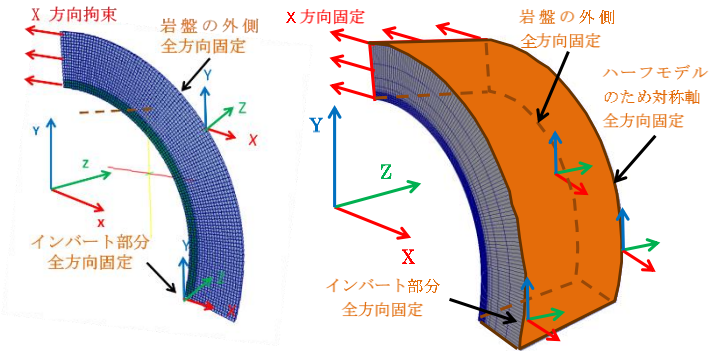
図 1 の i)に示すトンネル長手方向に 1 要素分の 1 断面メッシュを用いて，表 2 に示すトンネルの天端沈下量 2)を検討した．既往の点検結果と比較した結果を図 2 に示す．冬期は低温・低湿度となるため坑内側のコンクリートの収縮が大きくなり，覆工コンクリートの外部（坑内）と内部（地山側）のひずみ差が大きくなることによって，夏期よりも天端が沈下することが示されている．実際の天端沈下量の季節変化が解析でも適切に再現された．

4. 異なる配合・拘束条件による感度解析

ひび割れ発生に対する配合の影響を検討するために,表 3 に示す 2 種類の配合で解析を行った.施工時期は春期とした.解析に使用したメッシュを図 1 の ii)に示す.温度応力,乾燥収縮応力それぞれがひび割れ形態に与える影響を抽出するため,一方の応力を仮想的に 0 とした解析も行った.変形倍率は 50 倍とし,材齢 580 日の引張主ひずみを図 3,図 4 に示した.解析結果より，覆工表面全体に亘って生じる主ひずみは収縮駆動力によるものであり,側壁下部に見られる引張主ひずみは,温度応力がインバートに拘束されるこ

表 1　解析における仮定および設定条件

モデル化項目		仮定	仮定の詳細や理由
トンネル厚さ方向のモデル化範囲		覆工コンクリートの厚さ 0.3m 岩盤と一次支保 1.7m 合わせて 2m	覆工コンクリートの水和発熱による温度履歴は，トンネル厚さ方向に 2m 程度のモデル化を行えば，それ以上の岩盤の厚さを考慮しても大きな相違がないことが事前解析より確認された.従って計算量を減らす目的で,覆工コンクリート 0.3m と岩盤と一次支保 1.7m,合わせて 2m とした.
岩盤	物性値	硬質系岩盤	岩盤が良質で,変形が起こらないものを対象とし,弾性要素で表現した.
	温度	20℃	岩盤の温度は 20℃一定とした
地盤と覆工の接合部	力学的条件	圧縮応力伝達有り 引張応力伝達無し せん断応力伝達無し	覆工コンクリートと岩盤は防水シートによって縁切りされており,離れた場合には応力を伝えず,接触している場合には圧縮応力を伝えるとした.また,せん断方向は自由に変形するとした.
	熱力学的条件	温度伝達有り 湿度伝達無し	防水シートを介しての伝熱は考慮，水分移動は生じないと仮定.
覆工コンクリート		メッシュ寸法は乾燥を受ける面から 2cm 程度	メッシュ寸法が大きい場合,表面近傍と内部に発生する湿度勾配を考慮できないことなどから,メッシュ寸法は乾燥を受ける面から 2cm 程度と設定.
インバート		底面を全方向拘束	計算量を減らす目的でインバートのモデル化はせずに,全方向拘束することで表現した.
トンネル坑内の環境	型枠残存中温度	型枠残存期間中の温度 貫通トンネル坑内温度+5℃ 未貫通トンネル坑内温度+10℃	コンクリートの水和発熱やセントル等の機械が発する温度がトンネル坑内に籠り,セントル内温度が上昇するという報告がある.貫通トンネルの場合には外気が通るのでその効果は小さいと考え+5℃程度,未貫通の場合にはその効果は大きいと考えられるので+10℃とした.
	型枠熱伝達率	空気中への暴露の場合の 3 分の 1	コンクリートの水和発熱やセントル等の機械が発する温度がトンネル坑内に籠り,型枠から温度が空気中に伝達しにくいという既往の研究 1 より通常暴露面の場合の熱伝達率の 3 分の 1 とした.
	防水シートの熱伝導率	コンクリートの 30 分の 1	覆工コンクリートと岩盤と防水シートの間には空気が存在するが,その影響を考慮するために感度解析を行い，適切な熱伝導率を設定した.



i) トンネル長手方向に 1 要素分の 1 断面メッシュ　ii) 打ち込み単位(1 スパン 10.5m)のハーフモデルメッシュ

図1　解析メッシュ

キーワード　トンネル　覆工コンクリート　乾燥収縮　温度応力　ひび割れ
連絡先　〒113-8656　東京都文京区本郷 7-3-1　工学部 1 号館 3 階 329 号室　コンクリート研究室　TEL03-5841-6146

とにより発生することがわかる．中流動配合では従来配合と比較して,乾燥収縮は小さいが,水和熱が高くなるため,温度に起因するひび割れが発生しやすい.一方で,従来配合では乾燥収縮が大きく,水和熱が低くなるため,表面全体に発生するひび割れが認められる．解析で得られた場所ごとの温度履歴の相違を図 5 に示す．図に示す内側，外側とは覆工表面から 10cm 及び,20cm の位置の温度を示している.配合の違いによって,約 8℃上昇温度が異なるが,その影響で温度ひび割れの発生状況に違いが表れている.

次にひび割れ発生・進展に与える拘束の影響を見るために拘束条件を変えた解析を実施した.図 6 に,中流動配合でインバートによる拘束がない場合の材齢 580 日時点の主ひずみ分布を示す.インバートの拘束が無い場合には側壁にひび割れが発生しないことがわかる.図 7 は同じく中流動配合で,一次支保と二次覆工が完全に拘束された条件での主ひずみ分布を示している.このような背面拘束が強い場合には,覆工コンクリートを貫通する幅の大きなひび割れが全面に発生する結果となった.

以上,解析モデルにより得られた傾向は,実際のトンネル現場でも観察されることが報告されており [3],本研究の解析結果が実現象を妥当に再現できていると言える.

5. まとめと今後の課題

マルチスケール解析により,中流動配合では,乾燥収縮由来のひび割れは減少するが,インバートがある場合には温度応力によるひび割れが生じる可能性が高まることが示唆された.本研究は硬質な岩盤のトンネルを想定し,地山が覆工コンクリートに応力を与えない場合を対象とした.今後は岩盤が変形する場合や,材料,施工・養生方法の相違とひび割れ発生・進展の関連について,実際の点検記録などと体系的に比較することで解析手法の検証を続けるとともに,設計,施工,維持管理にフィードバックしていきたいと考えている.

参考文献

1) Multi-Scale Modeling of Structural Concrete (2008), K. Maekawa, T. Ishida and T. Kishi, Taylor and Francis.

2)西岡和則ら他:新型テレスコピックセントル工法を用いて 66 時間型枠を残置する効果について,トンネル工学報告書,第 24 巻, I -5,2014.12

3) 真下英人ら:トンネル覆工の収縮ひび割れに関する研究,トンネル工学論文集第 15 巻,pp1-11,2005.12

4) 坂田昇ら:覆工コンクリートの初期ひび割れについて，，須田博幸,コンクリート工学 Vol.43(2005)NO.8

表 2　トンネルの条件 [2)]

材料		施工時期	トンネル	
配合	W/C(%)		延長	測定位置
従来	52.5	冬期	1485m	坑口から 79.5～89.5m 付近

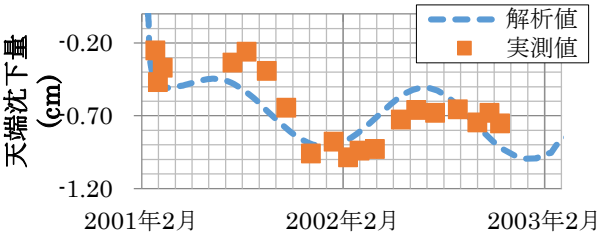


図 2　トンネル A の天端沈下量の季節変動 [2)]

表 3　配合条件

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)			
			W	C	S	G
従来	63	49	170	270	888	950
中流動	50	49	175	350	864	907

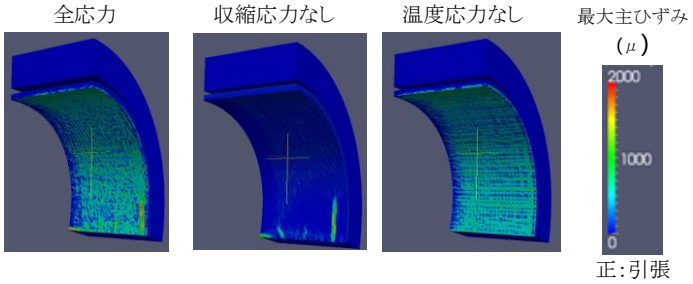


図 3　従来配合(材齢 580 日)

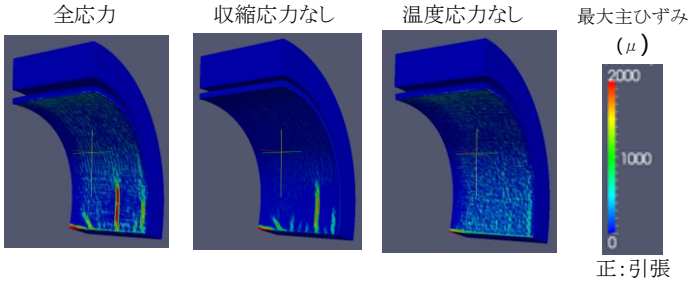


図 4　中流動配合(材齢 580 日)

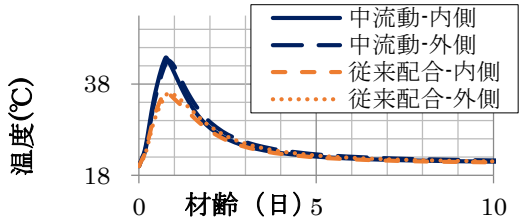


図 5 材齢と天端付近の覆工コンクリートの温度

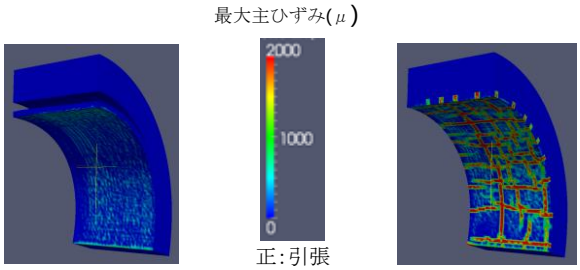


図 6 インバートの拘束なし　　図 7 背面拘束あり