論文 マルチスケール統合解析システムを用いた覆エコンクリートのひび 割れ解析と影響因子の定量評価

日下部 達哉^{*1}·石田 哲也^{*2}·松岡 茂^{*3}·土屋 智史^{*4}

要旨:本研究では、水和反応からひび割れ発生・進展までを追跡可能なマルチスケール統合解析システムを 用い、水和熱と収縮に起因する覆工コンクリートのひび割れの再現を試みた。その際、外力ではなくコンク リート材料そのものの体積変化に由来するひび割れと考えられるデータのみを取り上げた。解析結果より、 側壁部のひび割れはインバート拘束や温度応力に由来すること、天端部のひび割れ幅は材料分離を仮定する と大きくなること、天端部にスパンを跨いで入る太いひび割れは材料の変状に依らない可能性があること、 の三点が示され、既設トンネルの点検と性能判定の合理化に向けた基礎情報を得ることができた。 キーワード:覆工コンクリート、ひび割れ、水和熱、乾燥収縮、材料分離

1. はじめに

NATM 工法は, 掘削した山岳部分を一次覆工(吹付け コンクリート)で固め、ロックボルトを打ち込み、防水 シートを貼った後に、二次覆工(覆工コンクリート)で 表面を巻き立てるトンネル工法である。地山の安定性が 悪い場合には、鋼製支保工やインバート(覆工の下端を 繋げてトンネル断面を閉合するコンクリート部分)を設 けることもある。本工法では、一次覆工、ロックボルト と地山が一体となることで地山がトンネルを支え、通常 は二次覆工には構造的な応力が発生しない構造となって いる。この点で,覆工や支保工で地山を支えていた NATM 以前の在来工法とは対照的といえる。しかしながら、応 力が発生しない覆エコンクリートの品質に関する関心が これまで比較的低く、コスト削減や工期短縮が優先され る傾向にあった。高い水セメント比で早期に脱型する施 工方法が採用され、施工後のひび割れが多く報告される 場合もある^{1),2)}。現在,ひび割れの発生要因や,その維 持管理上の重要性は十分に整理されておらず、効率的な 維持管理を妨げている現状にある。

覆工コンクリートに生じるひび割れの要因は,地山の 変形などによる外力が要因となる「外的要因」と,コン クリート自身の体積変化等が要因となる「内的要因」に 大きく分けられる。このうち本研究では,外的要因によ るひび割れが発生しない条件の下,内的要因により発生 するひび割れを対象に解析的検討を行い,どのような内 的要因がどれほどのひび割れを生ずるのか,その関係性 を明らかにすることを試みる。それにより,外的要因に より生じる深刻なひび割れと,他のひび割れの区別が可 能になると考えられる。 解析的検討には、東京大学コンクリート研究室で開発 中のマルチスケール統合解析システム DuCOM-COM3³⁾ を用いる。これは、セメントの水和反応、空隙組織の形 成、空隙中の水分移動の各モデルをベースにして計算さ れる、水和熱、収縮、強度発現などの材料挙動と、ひび 割れ発生から破壊へと至る構造挙動、これら二つを連成 した解析が可能な解析システムである。

2. 解析条件の概要

解析的検討を行う断面の寸法は、下記の通りである。 なお、トンネル断面方向ならびに延長方向の対称性を考 慮して、4分の1モデルを適用した。通常断面を仮定し、 二次覆工の厚さは 300mm、一次覆工の厚さは 100mm、 二次覆工の上半半径は 5.3m、側壁半径は 7.95m とした。 また、二次覆工の1スパンが通常 10.5m であること、4 分の1モデルを適用したことから、延長は 5.25m とした。 加えて、地山の厚さを 1.6m とし、二次覆工と地山の間 の熱移動を考慮する。二次覆工、吹付コンクリート、地 山を合わせると、半径 r 方向の厚さは計 2.0m である。

図-1に,解析の拘束条件を示す。図内に示す xyz 軸 上で,対称面において対称の方向に(x = 0m において x 方向に, z = 5.25m において z 方向に)それぞれ節点を拘 束した。また,地山が安定であることを表現するために, 地山要素のうち r 方向に最も外側の節点に, xyz 全方向 拘束を加えている。

なお、本解析では、インバート自体の解析要素も設定 して併せて解析することで、その拘束状況を詳細に考慮 することとした。具体的には、図-1の中央および右側

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (学生会員) *2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻教授 博士(工学) (正会員) *3 鉄建建設株式会社 土木本部副本部長 博士(工学) (正会員) *4 株式会社コムスエンジニアリング 博士(工学) (正会員)





	開閉剛性	せん断剛性		
	(接触時)	(接触時)		
	[N/mm ² /mm]	[N/mm ² /mm]		
覆工	2.30E+2	9.20E-4		
インバート	2.30E+2 3.07E+0			
	開閉剛性 (離合時) [N/mm ² /mm]	せん断剛性 (離合時) [N/mm ² /mm]	摩擦 係数	
覆工	0.00	0.00	0.4	
インバート	インバート 2.30E+2		0.4	

表-1	地山と覆工の境界の物性値
-----	--------------

表 —	2	岩般の物性値	ī
1X	~		2

弹性係数 [MPa]	ポアソン比	単位体積質量 [kg/cm ³]
3.70E+4	0.25	2.20E-3

に示すように、インバートを打設した 50 日後に二次覆工 を打設する解析条件としている。

二次覆工,およびインバートの解析メッシュの大きさ に関しては,奥行 z 方向を 20cm,円周1方向を 20cm と した。半径 r 方向に関しては,内側表面は 2.5cm,地山 に接する外側は 7.5cm とし,その間は 1cm 刻みで内側か ら外側に向けて徐々に大きい要素となるように設定した。 トンネル内側の寸法を小さくしたのは,坑内温湿度環境 の変化をより精度よく追跡するためである。

解析要素に与える物性値に関して、地山(吹付コンク リートを含む)の物性値および地山と二次覆工の境界の 物性値を述べる。表-1に、地山と二次覆工の境界要素 の物性値を示す。実際のNATM工法では、地山からの拘 束を抑えるため、二次覆工と地山の間に滑りやすい防水 シートで縁切りを施している。このような状況を考慮し、



図-2 打設温度とひび割れ本数との関係 (川又ら⁷⁾より引用)

表一3 配合

空気量	W/C	s/a	単位量 [kg/m ²]			
[%]	[%]	[%]	W	С	S	G
4.5	50.0	52.5	170	340	925	863

二次覆工と地山が離れている時は開閉剛性もせん断剛性 もゼロなのは勿論のこと,触れている時でもせん断応力 をほぼゼロとした。また,インバートと地山の間では, 外力がかからない限りインバートの浮き上がりは考えに くいこと,硬化したコンクリート同士のせん断剛性が約 9.8N/mm²/mm であることから,表の通り設定した。

表-2に、地山要素に設定した物性値を示す。地山が 健全な状態での二次覆工の挙動を検討するため、地山は 弾性要素でモデル化した。弾性係数、ポアソン比および 密度は、硬岩系地盤を仮定して表の通り設定した^{4),5),6)}。

二次覆工の配合等の条件は、それぞれの解析ケースで 異なるため、各項で述べる。二次覆工のコンクリートの 物性値(弾性係数や強度など)は、与えられた配合、環 境条件のもと、熱力学計算に基づいて時々刻々と計算さ れる値を用いることとなる。

3. 解析の妥当性確認ー側壁部のひび割れ

以上の解析条件のもと,まずは覆エコンクリートの側 壁部に入るひび割れに対して解析の再現性を確認した。

川又ら⁷によって,施工中の実トンネルにおいて,打 設温度 20℃を境に,ひび割れ発生本数が急増したことが 報告されている(図-2)。これを踏まえ,実トンネルに おいて,打設温度が 15℃であり側壁部のひび割れが報告 されなかった1スパンと,打設温度が 24℃であり側壁部 のひび割れが報告された1スパンを取り上げ,計測と解 析の比較を行った。

本対象に対する解析条件は、下記の通りである。表-3に、本トンネルの配合条件を示す。対象2スパンとも 同配合である。

図-3には、温度条件および相対湿度条件を示す。温 度および相対湿度に関しては、現地での計測データが無



図-3 温度条件/相対湿度条件

く,何らかの形でそれらを仮定する必要があったが,貫 通の有無やトンネル長によって坑内環境は異なることが 多く,仮定には十分な根拠が必要である。そこで,複数 のトンネルで坑内環境を実測した馬場ら⁸⁰の研究より, 貫通の有無や長さが対象トンネル(貫通後,678m)と類 似しているケースを取り出し,それらの計測データと最 寄りのアメダスデータとを比較することで,坑内環境の 仮定にアメダスデータの適用が可能かを検証した。

取り上げたスパンはいずれも貫通後に覆工を打設し ているため、貫通後の坑内環境の仮定に関してのみ説明 する。貫通後の計測データを有すること、対象トンネル (678m)に比較的近い延長を有することを考慮し、馬場ら ⁸⁾の研究より,有明山トンネル (793m) および森トンネ ル (1,402m) に着目する。計測日時は 2001/09/02~09/07、 12/02~12/05 であり、アメダスデータも同日時を参照する こととする。最高温度と最低温度に関しては、トンネル では4℃~29℃, アメダスでは-3.2°C~27.1°Cで, 近い値 を取っている。最高相対湿度と最低相対湿度も、トンネ ルでは58%~90%、アメダスでは49%~93%と、近い値 を取っている。対象の現場は延長の短い貫通後のトンネ ルで、坑内は外環境の影響に左右されやすいと考えられ る。加えて、温度、相対湿度の最大値、最小値が、トン ネルとアメダスとで近似している。この二点を共に満た していることから、対象となる現場では、温度、相対湿 度ともに最寄りのアメダスデータを適用できる、と仮定

 03/23 打設, 打設後 10 ヶ月

 計測結果: ひび割れなし

 天端

 STRAIN-ZZ(Micro)

 200
 600
 1000

 00
 600
 1000

 インバート

図-4 解析結果(3月打設)

した。なお温度および相対湿度を参照したアメダスは、 それぞれ現場から約15km,約25km地点にある。

また,打設温度は各々15℃(03/23打設),24℃(05/29 打設), 脱型時間と養生時間は各々18時間, 地山温度は 年最高気温と年最低気温の平均値,20℃としている。 図-4および図-5に、各対象スパンについて、側壁部 の鉛直ひび割れの状況と対応する, 延長方向の直ひずみ のコンター図を示す。解析結果を見ると、3/23 打設のス パンは鉛直ひび割れの発生が見られず,5/29打設のスパ ンは側壁に幅 0.28mm,長さ 2.0mのひび割れが見られた。 ひび割れ幅は、1要素に1本のひび割れが発生すると仮 定し,要素寸法 20cm と最大ひずみ 1403uより算出した。 ひび割れ長は、200μ以上の領域(コンター図で青色以 外となっている領域)の要素数を数えて算出した。前述 の通り、3/23 打設のスパンでは側壁の鉛直ひび割れは報 告されておらず, 5/29 打設のスパンでは側壁に幅 0.30mm, 長さ2.8mのひび割れが報告されている。解析により、 現場の点検結果に近いひび割れが再現されていることか ら、鉛直ひび割れの発生の有無に関して、本研究で用い た解析的手法による再現性は高いと言える。なお、側壁 鉛直ひび割れは温度応力に由来すると従来から言われて いる通り、解析では打設温度が低い場合にひび割れが発 生せず、高い場合にひび割れが発生している。

<u>05/29 打設, 打設後 8 ヶ月</u>
計測結果 : 長さ 2.8m , 幅 0.30mm
天端
STRAIN-ZZ(Micro)
200 600 1000
,
インバート

図-5 解析結果(5月打設)

4. 解析の妥当性確認-天端部のひび割れ

次に,覆工コンクリートの天端部に入るひび割れに対 して解析の再現性を確認した。解析と比較する点検結果 には,高山⁹の検討のうち,夏期施工および冬期施工の 2つのケースを取り上げた。それぞれ3スパン分のひび 割れ状況が観察されており,前者では幅0.2mm以下のひ び割れが卓越するスパンのみが見られ,後者では幅 0.2mm以下のひび割れが卓越するスパンと,幅0.5mm以 上のスパンを跨ぐひび割れが卓越するスパンの,両方が 見られた。

本対象に対する解析条件は、下記の通りである。表-4に、本トンネルの配合条件を示す。図-6には、温度 条件および相対湿度条件を示す。図-6上側の計測され た温度/相対湿度の推移を参照し、温度に関しては、2006 年8月から、最低気温が2月で12°C、最高気温が8月で 18°Cの正弦関数として近似している。2006年8月まで は、夏期打設に関しては、打設後60日まで20度一定と し、60日からは、最高気温が60日時点で20°C、最低気 温が240日時点で10°Cの正弦関数として近似している。 同様に冬期打設に関しては、最高気温が打設後0日時点 で20°C、最低気温が180日時点で10°Cの正弦関数とし て近似している。相対湿度に関しては、最低相対湿度が 2月で40%、最高相対湿度が8月で100%の正弦関数と して表現している。なお、打設温度は各々29°C(夏期打

表一4 配合⁹⁾

	空気量	W/C	s/a	単位量 [kg/m ²]			
	[%]	[%]	[%]	W	С	S	G
夏	5.0	58.2	49	162	278	892	957
冬	5.0	57.0	49	162	284	889	954











設),16℃(冬期打設),脱型時間と養生時間は各々15時 間,地山温度は15℃としている。

図-7および図-8には、それぞれ夏季施工と冬季施 工のケースについて、高山⁹により観察されたひび割れ 状況と、天端部の縦断ひび割れに対応する、横断水平方 向の直ひずみのコンター図を示す。

まず,夏期施工(図-7)に関して説明する,計測で は,天端に主に0.2mm以下の縦断ひび割れが生じている。 解析結果を見ると,最大ひずみが697µであり,前章と同 様の算出方法で換算したひび割れ幅は0.14mmとなる。 よって,夏期施工のケースでは,解析結果はひび割れ幅 の傾向を適切に再現できていると言える。





図-7 計測結果および解析結果(夏期打設)⁹⁾





図-8 計測結果および解析結果(冬期打設)⁹⁾

表-5 配合 空気量 W/C 単位量 [kg/m²] s/a [%] [%] [%] W С S G 172 310 886 929 349 4.5 55.5 49 194 842 883 165 298 899 943 配合2 基準配合 20cm 10cm

22.5°

基

(1)

(2)

図-9 解析上での材料分離の領域

配合①

次に、冬期施工(図-8)に関して説明する。計測で は、0.2mm以下の細かい縦断ひび割れと、0.5mm以上の 太い縦断ひび割れが共に天端に見られている。解析結果 を見ると、最大ひずみが563µであり、前章と同様の方法 で換算したひび割れ幅は0.11mmとなるため、0.2mm以 下の細かい縦断ひび割れのみが解析上で再現されている といえる。前章にて、側壁部の鉛直ひび割れに関しては ひび割れ幅、長さとも精度よく再現できたことも考えあ わせると、本解析対象で観察された、スパンの端から端 まで入る0.5mm以上の太い縦断ひび割れは、本章の解析 上では考慮していない要因によるものと考えられる。例 えば、施工不良による材料の不均一性や外力に由来する ひび割れである可能性がある。

5. 材料分離を模擬した解析

前章を受け,材料分離を模擬した解析を行い,均一な 材料を模擬した解析との比較を行う。

本対象に対する解析条件は、下記の通りである。表-5に、本トンネルの配合条件を示す。材料分離を模擬し たケースには、既往の研究を参照し、基準配合、天端部 下部配合①、天端部上部配合②を、それぞれ図-9で示 す範囲に適用した。一方、均一な材料を模擬したケース には、基準配合のみを適用している。なお、材料分離を 模擬する際には骨材量のみ変化させ、水セメント比、空 気量、細骨材率は一定としている。

また,温度に関しては,最高気温が8月で30℃,最低 気温が2月で0℃の正弦関数として近似した。相対湿度 に関しては,最高相対湿度が8月で90%,最低相対湿度 が2月で40%の正弦関数により与えた。打設日時は,2 月と8月の中間の5月上旬としている。

なお,打設温度は15℃,脱型時間と養生時間は各々18 時間,地山温度は15℃としている。

解析結果(材料分離なし,打設後3年)



解析結果(材料分離あり,打設後3年)



図-10 解析結果(材料分離)

図-10には、天端部の縦断ひび割れに対応する、横 断水平方向の直ひずみのコンター図を示す。今回のケー スでは、乾燥や温度変化の影響を受けやすい表面に骨材 量が少ないことや、粗骨材量の減少により収縮ひずみが 増す、という既往の研究¹⁰⁾が存在することから、材料分 離がある場合の方が、横断水平方向の直ひずみが大きく なる、と予想される。実際に解析結果を見ると、材料分 離が無い場合の最大ひずみ(629µ,ひび割れ幅換算で 0.13mm)よりも、材料分離がある場合の最大ひずみ

(1058µ, ひび割れ幅換算で 0.21mm)の方が大きい。しかし, 計測で見られたような, スパンを跨いで入る太い ひび割れを再現するには至らなかった。

6. まとめ

本研究では,温度応力や乾燥収縮,材料分離など,コ ンクリート自身の変状に由来するひび割れに対し,マル チスケール統合解析システムを用いた再現解析を試みた。 その結果,以下の知見を得た。

(1) 側壁部の鉛直ひび割れに関しては、打設温度が高い

スパンでは発生しやすく,低いスパンでは発生しに くいという傾向を,解析でも精度よく再現できた。

- (2) 天端部の縦断ひび割れに関しては、細かなひび割れ に関しては再現したが、スパンの端から端まで入る 太いひび割れは、材料分離を仮定した解析を行って も十分に再現できなかった。
- (3) 天端の表面側にセメントペーストが多く,地山側に 骨材が多い材料分離の場合,天端のひび割れ幅が増 す可能性がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、日本トンネル技術協会・平 成28年度長期耐久性特別委員会(西村和夫委員長(首都 大学東京教授))での議論より有益な知見を得ました。こ こに謝意を表します。

参考文献

- 伊藤哲男,馬場弘二,城間博通,吉武勇,中川浩二: トンネル覆エコンクリートのひび割れ形態調査に よる剥落危険性評価,土木学会論文集,No.763, VI-63, pp.87-93, 2004.6
- 坂田昇、須田博幸:覆工コンクリートの初期ひび割 れについて、コンクリート工学、Vol.43、No.8、 pp.11-16、2005.8
- Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008
- 独立行政法人日本原子力研究開発機構:岩盤の長期 クリープ変形の評価(3.3.2.1), 2005
- 5) 近畿地方整備局:設計便覧 第3編道路編 第8章 トンネル,2012
- 6) 中央防災会議:東南海、南海地震等に関する専門調査会(第26回)3地盤構造に関する資料,2006
- 7) 川又篤,松岡茂,窪田賢司:山岳トンネル覆エコン 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
- 8) 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エコンク 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
- 高山博文:トンネル覆エコンクリートの初期ひび割 れ抑制に関する研究(博士論文),京都大学大学院, 2009
- 10) 水野希典,八木弘,岩尾哲也,松岡茂,西村和夫:覆 エ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,土木学会論文集 F1(トン ネル工学), Vol. 71 (2015), No. 3, p. I_11-I_27