

NATMトンネル覆工のひび割れ発生 に関する施工実態調査

Investigation of the Actual Situation of Lining Construction Upon the Occurrence of Cracks on Secondary Lining

越智修¹・登坂敏雄²・北川博通³・奥利之⁴・工藤暢章⁵

Osamu Ochi, Toshio Tosaka, Hiromichi Kitagawa, Toshiyuki Oku and Nobuaki Kudo

¹正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1横浜/伊豆/伊豆)

²正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1横浜/伊豆/伊豆)

³正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒020-0034 岩手県盛岡市盛岡駅前通1番41号JR盛岡支社[※])

⁴正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒020-0034 岩手県盛岡市盛岡駅前通1番41号JR盛岡支社[※])

⁵正会員 博士(工学) 株式会社 ダイアコンサルタント (〒331-8638 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)

The cracks on secondary lining are induced by external stress and internal stress. The second one is major pressuer in case of small convergence. Database was established by reports of lining construction in each tunnel. According to the database cracks tend to occur in the lining constructed in cold season at Tohoku shinkansen, in other side, cracks tend to occur in the lining constructed in summer season at Kyusyu shinkansen. Lining made of more weight of unit content of cement and water tend to crack. Lining stress at the tunnel crown is simulated by numerical analysis. The result of numerical analysis tend to accord with the database.

Key Words : NATM, secondary lining, crack, database

1. はじめに

NATMトンネルにおいて、施工後覆工コンクリートにひび割れが発生する場合が多くみられ、後年の維持管理において問題となっている。覆工ひび割れの発生原因には、地山の変形等により覆工に外力がかかることによる外的要因と、覆工コンクリート自体の性状により内部応力が発生することによる内的要因に大別される。本報告では内的要因に着目し、施工実績資料からひび割れ発生に起因する諸パラメーター(単位セメント量、打設温度など)と現在のひび割れ発生状況との相関について実態調査を実施し、数値解析によって定量的評価を行い、ひび割れ発生防止対策の検討に資することを目的とした。

なお、本調査では維持管理上問題が大きいと考えられる天端の水平ひび割れ(トンネル縦断方向)に着目して検討した。

2. 覆工ひび割れ原因の定性的要因

トンネル覆工コンクリートのひび割れ原因には、塑性圧、偏圧、緩み圧(鉛直圧)等の外的要因によるものと、自己収縮、温度応力、自重、乾燥収縮な

どのような設計・施工に起因する内的要因によるものが考えられる。

このうち外的要因による変状については、地山の岩種とひび割れの関係、内空変位とひび割れの関係を調査した結果、塑性地圧等の外的要因による変状が発生しやすいとされている凝灰岩及び泥岩のひび割れ発生率が他の岩種と比較して多くないこと、及び収束内空変位量とひび割れ発生に相関が見られないことから、着目するひび割れの原因は、地圧等の外的要因によるひび割れの可能性は少ないと考えられる¹⁾。したがって本検討では地圧等の外的要因は除外して、設計・施工等の内的要因に着目して行うものとした。

内的要因に起因するNATMの覆工コンクリートに発生するひび割れの主なものとしては、一般に、①セメントの水和熱による温度応力、②乾燥収縮、③環境状態の急激な変化(温湿度などの変化)などが挙げられる。①のセメントの水和熱による温度応力は2種類に大別される。1つは部材内部の温度差によるもの(内部拘束)、もう1つは外部拘束によるものである。福知山線第1名塩トンネルの測定結果によれば、覆工コンクリートの中心部と表面とはほとんど温度差がなく、内部拘束は無視できると

表-1 施工データ区間の抽出概要

トンネル名		工区名	全長 (m)	無筋コンクリート 区間長(a) (m)	打設データ 抽出区間長(b) (m)	無筋コンクリート区間長 に対する抽出割合 b/a×100(%)
東 北 新幹線	A トンネル	I 工区	3,840	3,686.0	3,686.0	100.0
		II 工区	3,540	3,520.1	3,520.1	100.0
		III 工区	3,720	2,161.4	1,597.52	73.9
		IV 工区	2,998	2,961.5	2,961.5	100.0
	B トンネル	I 工区	4,125	4,017.0	786	19.6
九 州 新幹線	C トンネル	—	640	585.3	585.3	100.0
	D トンネル	—	550	456.55	456.55	100.0
	E トンネル	—	1,080	1,089.75	1,089.75	100.0
合 計			36,328	32,936.1	23,922.22	72.6

考えられるため、ひび割れ発生原因は外部拘束による温度応力であると推定している²⁾。

3. 施工実態調査

覆工コンクリートの設計・施工実績資料から当時の施工条件を抽出し、別途調査された同位置における覆工のひび割れ発生状況との相関について統計的な分析を行うことにより、施工条件とひび割れ発生頻度との関連性について実態を得ることを試みた。

(1) 調査方法

本報告で対象とした施工データ区間の抽出概要を表-1に示す。なお、調査の目的上、鉄筋コンクリート及びファイバーコンクリート区間は除外し、無筋コンクリート区間においても抽出データが不足し、信頼性に欠ける区間は除外した。調査のフロー図を図-1に示す。今回の施工実態調査では東北新幹線、九州新幹線におけるNA T Mトンネル施工実績記録をもとに調査した。ひび割れ発生の内的要因に関するパラメーターとして、覆工コンクリートの打設月、打設温度、単位セメント量、単位水量、坑内気温を挙げ、施工実績記録よりこれらのパラメーター値を抽出した。次に、目視観察調査で得られたひび割れ展開図より各覆工スパンにおける水平ひび割れの有無を抽出し、先に挙げたパラメーター値とひび割れ発生頻度とのヒストグラムを作成し、両者の相関について検討した。

(2) 調査結果

a) 各トンネル（工区）のひび割れ発生率

各トンネルおよび工区のひび割れ発生箇所数および発生率を図-2に示す。これを見るとAトンネル（II），Aトンネル（IV），Bトンネル（I），Cトンネル，Dトンネルの発生率が概ね40%以上と高く、一番発生率が低いのはAトンネル（III）で、発生率は10.3%であった。以下に東北新幹線、九州新幹線のそれぞれのトンネルについて得たひび割れに関するヒストグラムの分析結果を述べる。

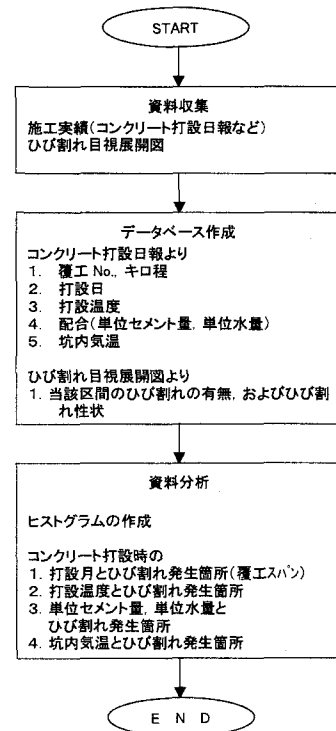


図-1 施工実態調査作業フロー図

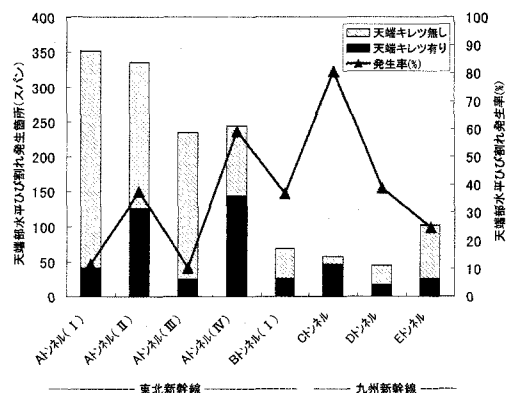


図-2 各トンネル工区のひび割れ発生頻度

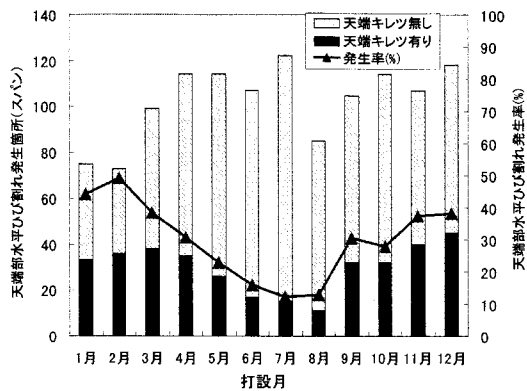


図-3 打設月とひび割れ発生頻度
(東北新幹線)

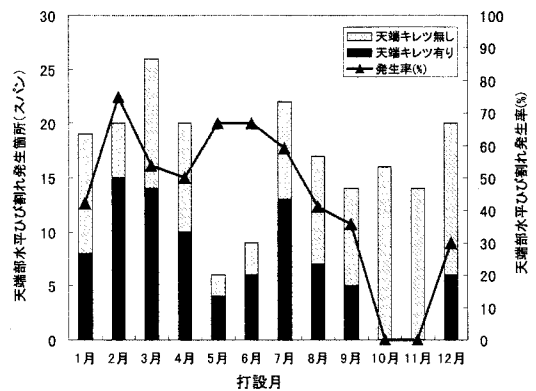


図-4 打設月とひび割れ発生頻度
(九州新幹線)

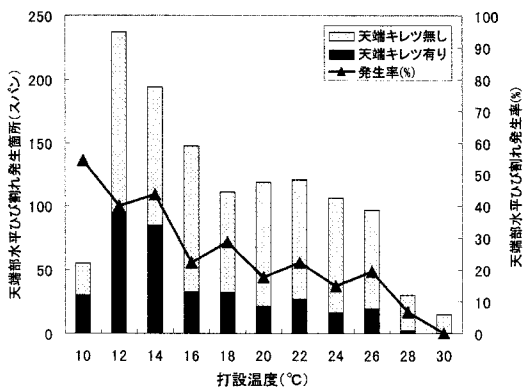


図-5 打設温度とひび割れ発生頻度
(東北新幹線)

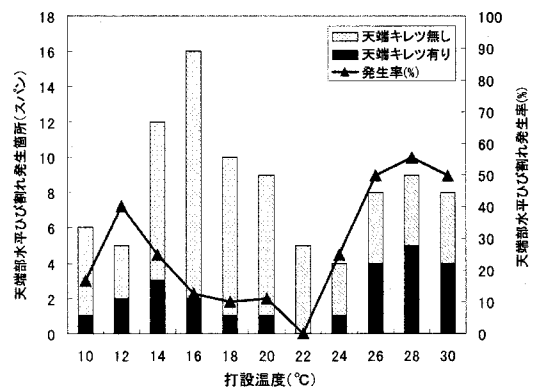


図-6 打設温度とひび割れ発生頻度
(九州新幹線)

b) 打設月とひび割れ発生頻度の関係

図-3、図-4 に東北新幹線、九州新幹線における各工区ごとの覆工コンクリートの打設月と、ひび割れ発生箇所数および発生率の関係を示す。これを見ると東北新幹線トンネルでは、7 月、8 月付近の夏期に打設した覆工でひび割れ発生率が小さく、11 月～3 月の冬期に打設した覆工の発生率が大きい傾向がみられる。一方、これとは対照的に九州新幹線トンネルでは、ひび割れ発生率は概ね夏場の 6 月頃をピークにして減少し、10 月～12 月頃にもっとも低くなる傾向がみられた。

両者の違いについて確定的な原因は不明であるが、施工当時の坑内気温や、コンクリートの打設温度、および型枠脱型直後の養生環境の違いなどが考えられる。

c) 打設温度とひび割れ発生頻度の関係

図-5、図-6 に東北新幹線、九州新幹線における各工区ごとの覆工コンクリートの打設温度とひび割

れ発生箇所数および発生率の関係を示す。これを見ると東北新幹線トンネルでは、打設温度が概ね 16℃を下廻るとひび割れ発生率が 40%以上になり、これ以上の打設温度では、ひび割れ発生率が 20%程度ではほぼ一定である。一方、九州新幹線トンネルでは、打設温度 22℃付近でひび割れ発生率が最も低く、これより打設温度が高くなっても低くなってもひび割れ発生率は増加する傾向がみられた。

両トンネルで得られた傾向を総合すると、覆工コンクリートの打設温度は概ね 15℃～23℃程度で最もひび割れ発生率が低いことが分かった。

d) 単位セメント量、単位水量とひび割れ発生率の関係

東北新幹線トンネルについて図-7 に覆工コンクリートの単位セメント量とひび割れ発生箇所数および発生率の関係を示し、図-8 に覆工コンクリートの単位水量とひび割れ発生箇所数および発生率の関係を示す。これを見ると大まかな傾向であるが、単位セメント量、単位水量が増加するにしたがい、

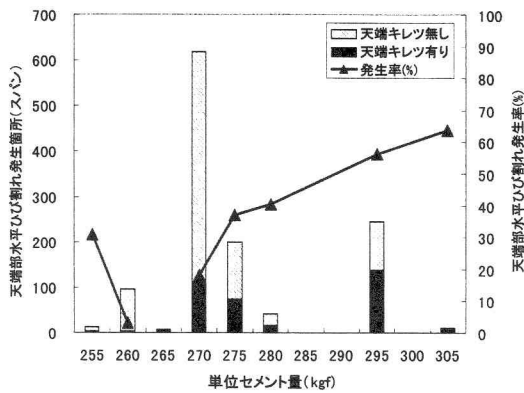


図-7 単位セメント量とひび割れ発生頻度
(東北新幹線)

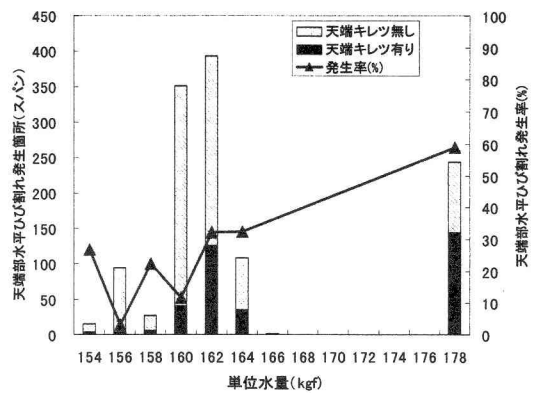


図-8 単位水量とひび割れ発生頻度
(東北新幹線)

ひび割れ発生率は増加する傾向にある。これらの傾向は、九州新幹線についても同様であった。

水セメント比 W/C とひび割れ発生率の関係について、図表は割愛するが、W/C が増加するほどひび割れ発生率は増加する傾向がみられた。

単位セメント量、単位水量、および水セメント比は、値がほぼ固定化されて配合が同様なケースが多いため、頻度分布図は分布範囲の乏しいものになった。このため、傾向を分析するにあたってサンプル数の少ない階級については、偶然誤差が含まれていることに注意する必要がある。

「トンネルコンクリート施工指針(案)」³⁾には、ひび割れが発生する内的要因の対策として、コンクリートの発熱量は単位セメント量にほぼ比例し、また乾燥収縮は単位水量を少なくすることで低減できるとしているが、今回の施工データの分析結果からも単位セメント量、単位水量が増すほど、ひび割れ発生率が増加している傾向がみられた。

4. FEMによるひび割れ原因の定量的評価

前節で述べた覆工コンクリートの施工実態調査から得られた知見をもとに、数値解析により諸パラメーター(単位セメント量、打設温度など)と覆工応力との関係をシミュレートし、力学的な裏付けを行った。コンクリートの水和熱を考慮し熱応力解析を取り入れたFEM解析を行って、ひび割れ発生メカニズムを定量的に評価した。解析では、コンクリートの非定常熱伝導解析と温度応力解析が可能な二次元FEM解析プログラムを用いた。

(1) 解析モデルの作成

コンクリートの水和熱を考慮した覆工コンクリー

トの応力解析は一般のマスコンクリート解析に比べ特殊であるため、解析結果がトンネルの実挙動をできるだけ忠実にシミュレートできるよう、本解析を行うに先立ち解析モデルの妥当性の検証を行った。

図-9 に解析モデルを示し、表-2 に入力物性値を示す。設定した物性値以外で坑内外気と覆工の熱伝達率の値は、型枠の有無、表面に吹く風の速度、表面の乾湿の状態によって異なり、かなり幅を持った値として評価しておく必要があるため、解析結果に影響することが想定された。また、温度応力以外に、乾燥収縮、自己収縮を含むコンクリートの収縮およびクリープの影響、さらに覆工と吹付けコンクリートとの背面拘束による影響も大きいと考えた。

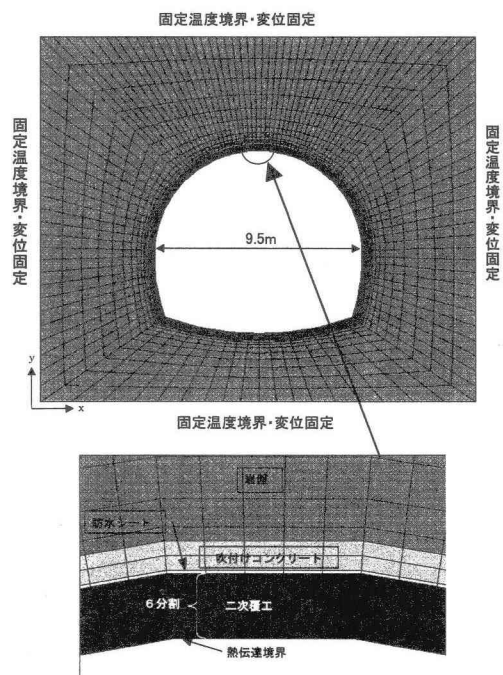


図-9 解析モデル

表-2 入力物性値

部位	項目	単位	解析入力値	引用根拠
二次覆工	熱伝導率	$W/m^2\cdot^{\circ}C$	2.7	文献 ⁽⁴⁾ 4.2.3
	密度	kg/m^3	2300	文献 ⁽⁵⁾ 表4.4.1
	比熱	$KJ/kg\cdot^{\circ}C$	1.15	文献 ⁽⁴⁾ 4.2.3
	セメントの種類	—	普通ポルトランドセメント	施工記録
	単位セメント量	kg/m^3	298	施工記録
	単位水量	kg/m^3	178	施工記録
	相対湿度	%	65	測定結果の年平均
	体積表面積比	mm	300	
	初期(打設)温度	$^{\circ}C$	13.5	施工記録
	設計基準強度 f_{ck}	N/mm^2	28.9(試験値)	施工記録
	圧縮強度 $f_c(t)$	N/mm^2	$f_c(t) = (t/(a+bt)) \cdot d(i) \cdot f_{ck}$	文献 ⁽⁴⁾ 4.2.5
	引張強度 $f_{tk}(t)$	N/mm^2	$f_{tk}(t) = c \cdot \sqrt{f_c(t)}$	文献 ⁽⁴⁾ 4.2.5
	ヤング率	N/mm^2	$E_s(t) = 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{f_c(t)}$	文献 ⁽⁴⁾ 4.2.5
	ポアソン比	—	0.2	文献 ⁽⁵⁾ 3.2.6
	線膨張係数	—	1.00E-05	文献 ⁽⁵⁾ 3.2.7

a) 熱伝達率の影響検討

熱伝達率の値の違いが温度応力に及ぼす影響度合いを検討した。風速に応じた熱伝達率については、山川⁽⁶⁾によって実験が行われている。それによると、風速 1~4 m/s にかけて熱伝達率は4~20 W/m²°C にほぼ線形的に増加する結果が得られている。坑内風速の正確な把握はできていないが、小さな風速であると想定される。従って、風速に応じて熱伝達率の変動が大きい山川らの実験結果をもとに、熱伝達率 4~20 W/m²°C の範囲で検討した。検討結果を表-3に示す。熱伝達率が4 ~ 10 W/m²°C の値の差が、10~20 W/m²°C の値の差より大きいことが分かる。

既往の報告⁽⁷⁾でも、熱伝達率の違いが、シールドトンネル二次覆工の温度上昇にどの程度影響するか検討されており、同様の傾向が見られる。

本検討において設定した熱伝達率の範囲では、覆工応力で0.5 N/mm²程度の差が生じた。この応力度は覆工の引張強度2.5 N/mm²の約1/5に相当し、熱伝達率の影響が大きいことが分かる。しかし、施工時の風速など不明瞭な点が多いため、安全側の配慮から施工時に風速が小さいと想定し、熱伝達率を4 W/m²°Cとして検討を進める。

本検討では、熱伝達率の設定値に応じた応力変動幅を把握するに留めたが、施工時の風速について記録が得られる場合は適宜考慮する必要がある。

表-3 熱伝達率の検討結果

	熱伝達率 (W/m ² °C)	最高温度 (°C)	坑内側縁応力 (引張) (N/mm ²)
Case1	4	28.5	0.86
Case2	10	25.8	0.56
Case3	20	24.1	0.38

b) 収縮・クリープの影響検討

乾燥収縮・自己収縮・炭酸化収縮による体積変化ならびにクリープが、覆工応力に及ぼす影響度合い

を検討した。収縮やクリープの算定に関わる物性値は、単位セメント量、単位水量、水セメント比、相対湿度、体積表面積比である。収縮ひずみの値、単位応力当りのクリープひずみの算定式は、コンクリート標準示方書⁽⁵⁾に準じた。

検討結果として図-10にクラウン部坑内側の縁応力と引張強度の関係を示す。温度応力のみを考慮したケースでは、ほぼ1ヶ月程度で応力値が収束している。これに対し、収縮を考慮したケースでは、打設後10日前後からこの影響が大きくなっており、解析モデルの妥当性を検討する上で無視出来ないことがわかった。

クリープを考慮した場合、考慮しない場合と比べて引張応力は大きく低減されて評価された。ただし、既往のクリープの研究は、主に圧縮側を対象に行われてきた経緯があり、引張側のクリープについては技術的に十分解明されていない状況にある。

本検討では、圧縮側と同じクリープひずみが発生すると仮定して応力を算定したが、このような背景から、現時点では参考値として取り扱うこととし、影響度合いの把握に留めた。

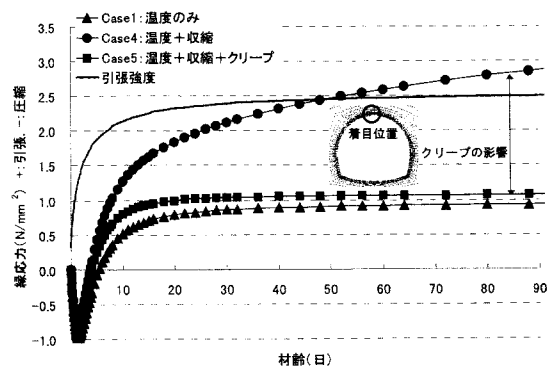


図-10 収縮・クリープの影響を考慮した二次覆工(クラウン部)の応力時刻歴

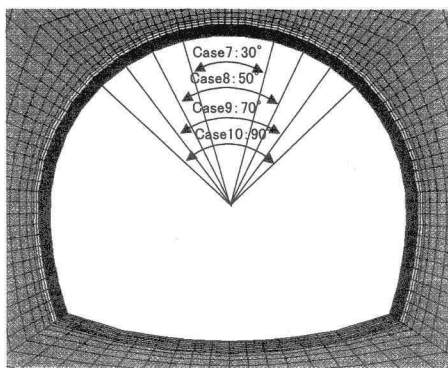


図-11 覆工背面の隙間を考慮する範囲と解析ケースとの対応

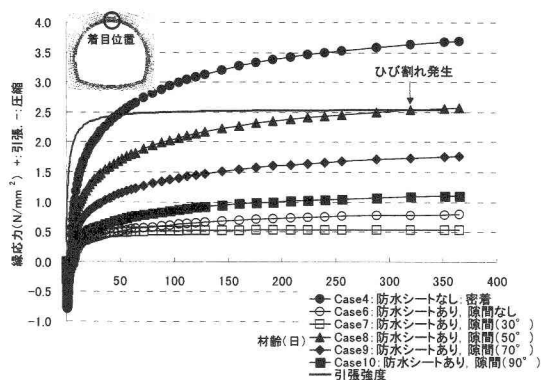


図-12 クラウン部の坑内側覆工応力の時刻歴と引張強度の関係

d) 背面拘束状態の影響検討

防水シートまたは緩衝シートは、背面拘束を小さくして、ひび割れが発生させないことを目的に設置されているが、シートが配置されたトンネルでもひび割れは発生しており、特に天端部に多いことが既往の報告⁷⁾で判明している。これらの要因として、天端部には隙間が生じやすく、側壁や脚部と比較して拘束の程度に差が生じている可能性が高いことが挙げられる。検討した解析ケースを図-11に示す。隙間が生じる範囲としてCase 7～10の4ケース想定した。防水シートによる拘束力の緩和は、防水シートの部分を薄く柔らかな要素でモデル化した。また、天端部で隙間を考慮するため、自重の作用・収縮作用に伴う覆工の坑内側への変形を拘束しないようにモデル化した。

解析結果として、図-12に各ケースにおけるクラウン部の坑内側覆工応力の時刻歴と引張強度の関係を示す。図-12に示すように、施工条件（防水シートあり）を考慮したCase 7～10の検討結果では、

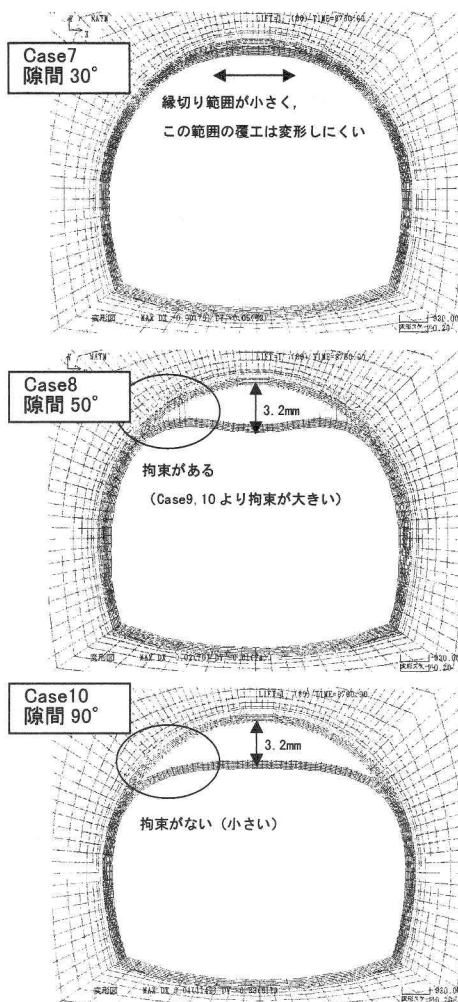


図-13 覆工応力の差が生じる原因

Case 8（隙間範囲50°）が打設後330日経過後に引張強度を越える検討結果となった。ただし、クラウン部の覆工鉛直変位量はほとんど違いは見られなかった。Case 8～Case 10において、クラウン部の覆工鉛直変位量に差がないにもかかわらず、覆工応力に違いが見られたのは、図-13に示すようにCase 8がCase 9,10に比べて肩部から側壁部の拘束状態に違いがあり、クラウン部に引張応力が出やすいような変形モードになったためと考えられる。このように、クラウン部のひび割れ発生の有無は、覆工全体の挙動に支配されている。

(2) 本解析

前節で検討した知見に基づき解析モデルを決定した。すなわち、熱伝達率を $4\text{ W/m}^2\text{C}$ 、乾燥収縮を

表-4 解析ケース

ケース名	単位セメント量 (kgf)	単位水量 (kgf)	打設温度 (°C)	気温 (°C)	湿度 (%)	検討項目
①	268	161	22	15	65	基本ケース
②	298	178	22	15	65	エグットの配合
③	268	161	15	15	65	打設温度
④	268	161	30	15	65	打設温度
⑤S	268	161	26	注1)	65	打設時期およびエグットの配合
⑤W	268	161	14	注2)	65	
⑥S	298	178	26	注1)	65	
⑥W	298	178	14	注2)	65	

注1) 季節変動を考慮 (夏期打設)
注2) 季節変動を考慮 (冬期打設)

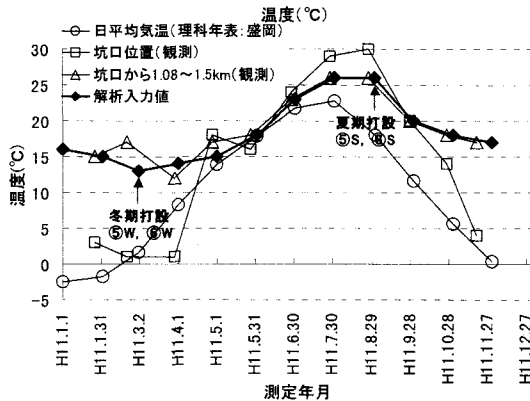


図-14 坑内気温の変動

考慮、背面拘束については天端を中心に隙間範囲50° (Case 8) として本解析を行った。

覆工コンクリートの施工実態調査から得られた知見をもとに解析ケースを表-4のように設定した。表-4で① vs. ②は単位セメント量、単位水量の違いを見るものである。① vs. ③ vs. ④は打設温度の違いを見るものである。⑤S・⑥S vs. ⑤W・⑥Wは季節変動を考慮した場合、打設時期 (夏期、冬期) の違いを見るものである。ひび割れ発生の判断は、天端における覆工コンクリート坑内側の発生縁引張応力とコンクリートの引張強度を比較して評価した。なお季節変動に関する坑内気温の設定は、東北新幹線トンネル施工時に観測した実測値等を参考にして設定した。図-14に坑内気温の変動図を示す。

a) 解析結果1 コンクリートの配合に関する検討

図-15に単位セメント量、単位水量が異なるケース①、②の解析結果を示す。図-15をみると、水セメント比60%の場合、単位水量、単位セメント量の多いケース②の方が単位水量、単位セメント量の少ないケース①より引張応力が高く、単位水量、単位セメント量が多い配合でひび割れが生じやすい傾向がみられた。

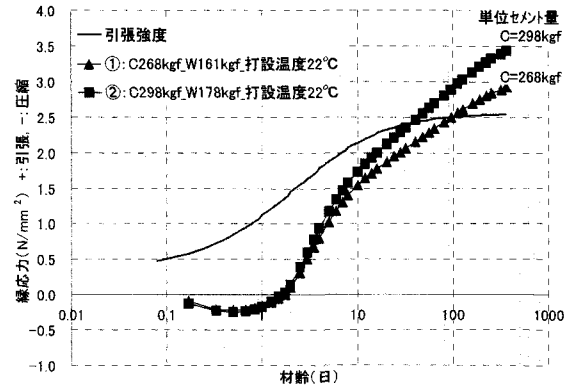


図-15 単位セメント量、単位水量の違いによるクラウン部坑内側応力の関係

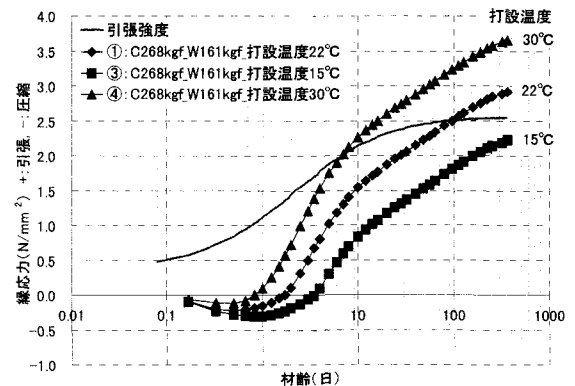


図-16 覆工打設温度の違いによるクラウン部坑内側応力の関係

b) 解析結果2 覆工打設温度に関する検討

図-16に覆工打設温度が違うケース①、③、④の解析結果を示す。図-16をみると、打設温度が高くなるほど引張応力が高く、ひび割れが生じやすい傾向がみられた。打設1年後における引張応力において、ケース③15°Cとケース①22°Cとの引張応力の差は0.70 N/mm²、ケース①22°Cとケース④30°Cの引張応力差も0.73 N/mm²であり、打設温度と発生引張応力との間にほぼ線形関係が認められた。

c) 解析結果3 季節変動を考慮したコンクリートの配合に関する検討

図-17に季節変動を考慮した場合、夏期に打設したケース⑤S (単位セメント量268kgf, 単位水量161kgf)、⑥S (単位セメント量298kgf, 単位水量178kgf) の解析結果を示し、同様に図-18に冬期に打設したケース⑤W (単位セメント量268kgf, 単位水量161kgf)、ケース⑥W (単位セメント量298kgf, 単位水量178kgf) の解析結果を示す。図-17、図-18

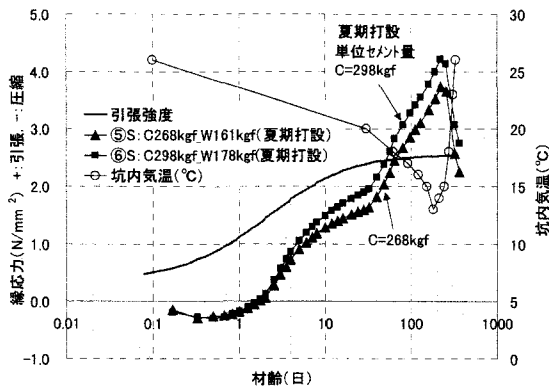


図-17 夏期に打設した場合のクラウン部坑内側応力
(季節変動を考慮)

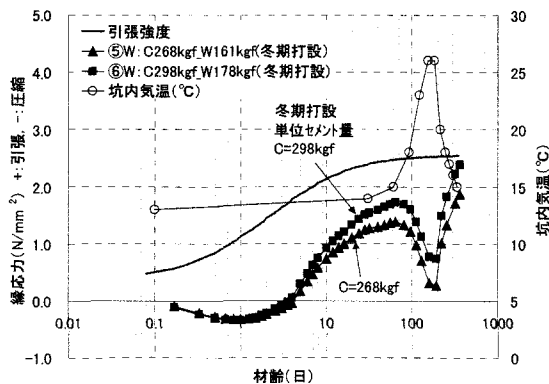


図-18 冬期に打設した場合のクラウン部坑内側応力
(季節変動を考慮)

をみると、いずれの配合でも冬期に打設した場合の方が、夏期に打設した場合に比べ、縁応力の発現が低いことが分かった。

5. まとめ

(1) 結論

コンクリートの打設温度、配合、打設時期、覆工天端部背面の隙間等の違いにより、ひび割れの発生状況に変化が見られることを、施工記録と数値解析において見出すことができた。本報告で得られた主な知見は以下のとおりである。

i) **コンクリートの打設時期**：東北新幹線、九州新幹線の両者において、コンクリートの打設月によりひび割れ発生率に違いが見られた。FEM 解析による季節変動を考慮した解析では、冬期に打設した場合の方が夏期に打設した場合よりひび割れは生じにくい結果が得られた。

ii) **コンクリート打設温度**：施工記録によると、コンクリート打設温度が概ね 15～23℃程度でひび割れの発生が最も少なく、それより高くなっても低くなってもひび割れ発生率が上がる傾向が見られた。FEM 解析結果では、コンクリートの配合が同一かつ坑内気温が一定な場合、数値上、打設温度が低いほど覆工天端の縁引張応力は単調減少し、ひび割れが発生しにくくなった。

iii) **コンクリートの配合**：施工記録によると、単位セメント量、単位水量が増すほど、ひび割れ発生率は増加する。FEM 解析結果でも同様な傾向が得られた。

iv) **覆工天端部背面の隙間**：覆工天端部の隙間範囲（非拘束範囲）を 30°、50°、70°、90° に設定して解析した場合、50° の範囲に隙間がある条件において、ひび割れ発生の可能性が最も大きかった。

(2) 今後の課題

本報告では、施工実態調査の結果を通してひび割れ発生因子について検討した。しかしながら、施工資料のみでは説明が困難な問題点も判明した。以下に今後の課題を示す。

i) **打設月とひび割れ**：東北新幹線と九州新幹線では、発生率が高くなる季節が異なった。型枠脱型後の養生環境の影響等、より詳細な検討が必要である。

ii) **混和材（剤）の有無、および種類**：コンクリートの単位水量を低く抑えたり、水和熱による温度上昇の抑止、乾燥収縮の抑止等を目的として、各種混和材（剤）が用いられており、ひび割れ防止に効果があるとされている。型枠脱型後の養生環境の影響や混和材（剤）をトンネル覆工に適用した場合のひび割れ防止効果について、今後、模型実験による検証が重要であると考えられる。

参考文献

- 1) NAIM 設計施工実態調査 2002 日本鉄道建設公団盛岡支社
- 2) NAIM における 2 次覆工のクラック 1982 トンネルと地下 Vol. 13-8
- 3) トンネルコンクリート施工指針（案）2000 土木学会
- 4) コンクリート標準示方書〔施工編〕2002 土木学会
- 5) コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕2002 土木学会
- 6) コンクリートのひび割れ制御指針 1986 日本コンクリート工学協会
- 7) 浅井大樹・大沼博志・川田雅紀：セメントの水和熱によるトンネル覆工コンクリートの温度解析、平成14年度土木学会北海道支部 論文報告集第59号 p.p. 800～803