

I - 72

北海道におけるトンネルライニングの温度依存症と施工に関する提案

開発土木研究所	正会員	中井 健司
開発土木研究所	正会員	小林 将
北海道大学工学部	学生員	湯浅 浩介
北海道大学工学部	フェロー	三上 隆

1. はじめに

NATMにより施工されたトンネルの2次覆工コンクリートには、気象条件等にもよるが、在来工法に比べて、ひび割れが多く発生する傾向にあると著者らは考えている。2次覆工は、トンネルの機能を長期間保持するための重要な構造物であるが、NATMにおいては地山自身によりトンネルの安定を図るという考え方に立っているため、2次覆工の役割が在来工法における覆工と設計の考え方が異なる面もある。したがって膨張性地山などの特殊な場合を除いて、2次覆工には外荷重が作用しないものとして設計巻厚、設計基準強度などは、使用条件を満足させる考え方に基づいていると考えられる。近年、NATMの普及とともにひび割れの原因究明、対策等について調査研究が行われているが、本報告では特に北海道のような積雪寒冷地における設計、施工方法の事例を基に寒冷地におけるトンネル覆工のひび割れ対策、施工方法について検討を行った。

2. 2次覆工ひび割れの発生原因について

コンクリートのひび割れが発生する要因は施工、環境条件、コンクリート性状、外力等があげられるが、温度降下や乾燥によるコンクリートの収縮が1次覆工面で拘束（外部拘束）されることも原因と考えられる。

このコンクリートに収縮ひずみを発生させる主な要因として（1）セメント硬化中に発生する水和熱によって温度が上昇、降下することにより発生する温度収縮、（2）コンクリート打設後の外気温の低下等による温度収縮、（3）コンクリートの乾燥収縮などがあげられ、これらの2つ以上の要因が重なって作用することが考えられる。一般にセメントの水和熱による温度上昇はコンクリートの打設後1～2日で最大温度となり、以降外気温まで降下する。この時の最大温度はセメントの種類、単位セメント量、打設温度により異なるが15℃～20℃程度の上昇を示す。したがって施工時期を考えた場合、一般に夏期に打設したコンクリートにひび割れが発生しやすい傾向があると考えられるため、高温時のコンクリート打設に際しては骨材やコンクリートの温度上昇に関して十分な注意がなされている。しかし、今回報告する一つの事例は厳冬期に施工したコンクリート覆工にひび割れが発生したケースであり、同じ構造でありながら暖かい時期に打設した部位にはひび割れの発生が見られなかったことから、冬期の施工状況に何らかの原因があったと思慮される。

3. トンネル覆工のひび割れ事例

3-1 トンネル事例の概要

ここに紹介するトンネルは掘断面約100㎡、扁平率=1:0.7と比較的大きな扁平断面トンネルである。標準断面図を図-1に示す。土被りは20m程度あり、地質はN値=30～50の比較的良好なローム質火山灰および火山灰混じり砂礫からなる。2次覆工の施工は吹き付けコンクリート施工後、変位の

The proposal on temperature dependence disease of the tunnel lining and construction
in Hokkaido

by Kenji NAKAI, Masaru KOBAYASHI, Kousuke YUASA, Takashi MIKAMI

収束を確認した後施工されており、施工時期は11月中旬である。コンクリートの打設は吹き上げ方式を採用しており、移動式セントルにより1スパン10.5mの延長を打設開始から脱型完了までの時間を19Hのサイクルで施工している。養生方法はジェットヒーターによる防寒養生を行っており、養生温度は15℃である。

3-2 ひび割れの発生状況

ひび割れは冬期に施工したブロックで発生しており、いずれも無筋コンクリート断面の区間である。上記区間の中でも特に断熱材が設置されているブロックについては、ひび割れ幅が大きく延長も長い。ひび割れはトンネル天端の縦断方向に発生しており、円周方向には見あたらなかった。また、ひび割れの深さを測定した結果、貫通したものは見られなかった。

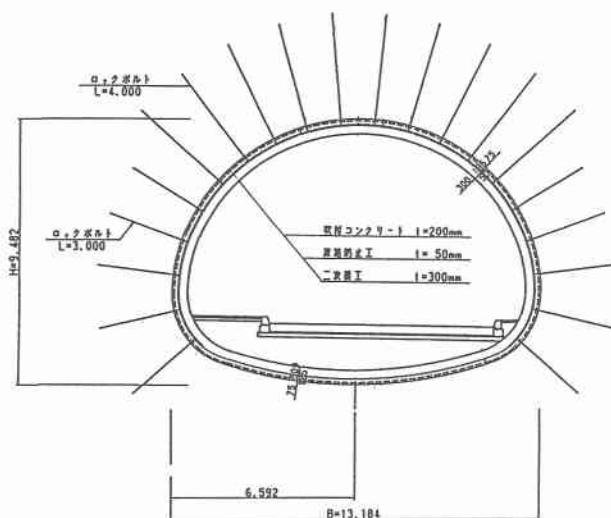


図-1 標準断面図

3-3 ひび割れ発生原因の推定

当該トンネルの天端に発生したひび割れの発生原因について推定してみると、以下の3つの事項が大きな原因ではないかと考えられる。

①型枠の早期脱型

型枠の取り外しは、コンクリートの試験練りを行い、コンクリート天端にひび割れが発生しないための脱型時間を決めている。しかし、天端部のコンクリート強度は施工条件、環境条件に左右されやすく、ひび割れ発生しやすい状況にあった可能性が考えられる。

②コンクリートの温度ひび割れ

厳冬期に施工した無筋区間でひび割れが発生しており、特に断熱材を施工した区間のひび割れ幅が大きい。このことから、打設後のコンクリート温度の最高温度到達時における内部と表面の温度差による内部拘束が原因である可能性が考えられる。

③乾燥収縮

乾燥収縮によるひび割れは、一般に構造物が外部拘束を受ける状態の場合に発生し、その多くは貫通する。今回の場合、貫通ひび割れが見られないことから、乾燥収縮単独での発生の可能性は小さい。しかし、乾燥収縮によりひび割れ幅が増加することは十分に考えられるため、2次的な原因としての可能性が高いと思われる。以上のことから推定するよ、今回発生したひび割れは、型枠脱型時のコンクリートの自重による曲げひび割れと、コンクリート内部と表面の温度差による温度ひび割れの相乗効果が原因となって発生し、その後コンクリートの乾燥収縮によりひび割れ幅が増大したものと推定される。

3-4 温度応力解析によるひび割れの検討

今回のトンネル事例でひび割れの発生原因と考えられる型枠の早期脱型、コンクリートの温度応力について、養生温度をパラメーターとして2次元FEMによる温度解析および応力解析を行った。

①解析モデル

解析に用いたモデルを図-2に示す。温度解析の解析範囲はクラウン部とし、境界条件はコンクリート、

地盤にそれぞれ初期温度を設定し、2次覆工の坑内側は材齢19Hまでは養生温度（15℃）、それ以降は坑内温度とした。応力解析については2次覆工の自重、覆工内外の温度差を考慮し解析を行った。

②解析ケース

解析は脱型後の坑内温度をパラメーターとした下記の3ケースとし、それぞれ脱型後19H、24H経過した時の2次覆工天端の応力状態について比較した。

CASE1：脱型時（19H）まで15℃で養生、それ以降の坑内温度を5℃とする。（解析範囲）

CASE2：脱型時（19H）まで15℃で養生、それ以降の坑内温度を10℃とする。

CASE3：脱型時（19H）まで15℃で養生、それ以降の坑内温度を15℃とする。

③解析結果および考察

解析結果一覧を表-1に示す。解析結果を基にコンクリート標準示方書で示す次式

温度ひび割れ指数 $I_{cr}(t) = f_t(t) / \sigma_t(t)$

$\sigma_t(t)$ ：材齢t日における部材内の応力の最大値

$f_t(t)$ ：材齢t日におけるコンクリートの引張強度

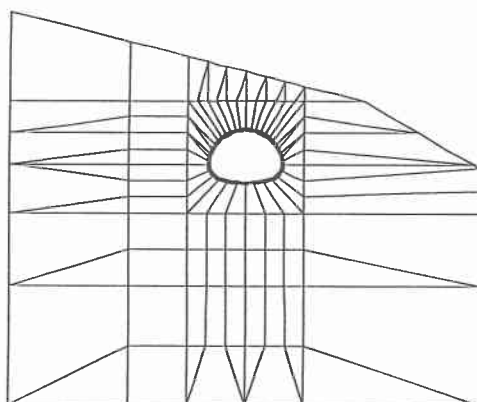


表-1 解析結果一覧

	CASE1	CASE2	CASE3
外気温（℃）	5.0	10.0	15.0
コンクリート打設温度（℃）	15.0	15.0	15.0
養生温度（℃）	19H まで～15℃ 以降～5℃	19H まで～15℃ 以降～10℃	15.0
①脱型時の自重による 引張応力 σ_1 (kg/cm ²)	3.9	3.9	3.9
脱型時のコンクリート温度 （℃）	内	24.2	24.2
	外	30.7	30.7
	差	6.5	6.5
②脱型時の温度による 引張応力 σ_2 (kg/cm ²)	3.6	3.6	3.6
①+② $\sigma_1 + \sigma_2$	7.5	7.5	7.5
脱型時のコンクリート 引張強度 σ_{t1} (kg/cm ²)	9.0	9.0	9.0
ひびわれ指数 $\sigma_{t1} / (\sigma_1 + \sigma_2)$	1.20	1.20	1.20
③最大温度差時の自重による 引張応力 σ_3 (kg/cm ²)	3.1	2.1	1.9
最大温度差時の コンクリート温度（℃）	内	19.8	22.2
	外	31.2	31.6
	差	11.4	9.2
④最大温度差時の温度による 引張応力 σ_4 (kg/cm ²)	6.5	5.2	4.3
③+④ $\sigma_3 + \sigma_4$	9.6	7.3	6.2
最大温度差時のコンクリート 引張強度 σ_{t2} (kg/cm ²)	9.3	9.5	9.8
ひびわれ指数 $\sigma_{t2} / (\sigma_3 + \sigma_4)$	0.97	1.30	1.58

（要素分割詳細図）



図-2 解析モデル

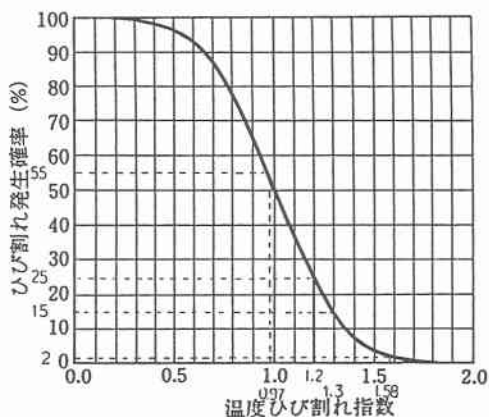


図-3 温度ひび割れ指数～発生確率

により求めた。図-3に温度ひび割れ指数と温度ひび割れ発生確率の関係を示す。脱型時（19H後）におけるひび割れの発生確率は25%、覆工内外の温度差が最大となる時（24H後）はCASE1で約55%、

CASE 2で約15%、CASE 3で2%となる。このことから、脱型後急激に低温状況下にさらされることにより、ひび割れ発生の確立が大きくなることが伺える。また、クラックの発生後は時間の経過と共にコンクリートの硬化温度、外気温度の低下による温度収縮、またコンクリートの乾燥収縮等によりクラック幅が進行した可能性が充分考えられる。

4. 対策法の検討

今回の結果を踏まえて、今後のトンネルの二次覆工の冬期施工を考えた場合、ひび割れ防止対策を講じる必要がある。現在一般に考えられているひび割れ対策法としては下記のものと考えられるが、数々の問題点もあるのが現状である。

①コンクリートの品質の改良

コンクリートの体積膨張、水和熱の抑制を目的とし膨張性混和剤、減水剤を用いて引張応力、乾燥収縮の低減を行う方法が考えられるが、防止効果は小さいようである。逆に厳冬期の施工の場合、脱型強度を確実に確保するために初期強度の高いセメントを使う方が効果があると考えられる。

②補強鉄筋

ひび割れ用心鉄筋を入れる方法が考えられるが、巻厚が薄い場合コンクリートの打設が難しくなる等の問題がある。SF（スチールファイバー）を用いる方法もあるが比較的良好な結果を得ているようである。

③養生温度の検討

脱型後の養生温度をできるだけ保ち、コンクリートの温度降下速度をできるだけ緩和することによりひび割れの発生因を抑制できると考えられる。

5. まとめ

今回の解析結果からも言えるように、冬期施工における型枠の早期脱型、および脱型後の急激な温度変化により生じるコンクリートの温度応力が、ひび割れ発生の大きな要因であると考えられる。特に断熱材を覆工内側に設置した箇所では、冬期に防寒のために給熱養生を行うことが、覆工内外の温度差による温度応力を大きくさせていると思われる。

したがって、今後断熱材施工した覆工コンクリートの打設にあたってはコンクリートの温度降下速度を緩和するなど、養生方法について充分検討する必要があると考えられる。また、初期強度の高いコンクリートや、SFコンクリートの使用などもひび割れ抑止効果が期待できると考えられる。今回の解析は特定の断面での検討であったが今後、断面形状、養生温度等の条件を変えた時のひび割れ発生状況について比較検討して行きたいと考える。

〔参考文献〕

- 1) コンクリート標準示方書（施工編） 平成8年度 （社）土木学会 pp.182～193