

## 二次覆工のひび割れ発生に対する 施工状態・環境の影響について

### ON THE TUNNEL SURROUNDINGS INFLUENCING UPON THE OCCURRENCE OF CRACKS ON SECONDARY LINING

杉浦高広<sup>1)</sup>・中井健司<sup>2)</sup>・佐藤 京<sup>2)</sup>・西村克弘<sup>2)</sup>・三上 隆<sup>3)</sup>

Takahiro SUGIURA, Kenji NAKAI, Takashi SATOH and Takashi MIKAMI

According to manuals on countermeasures against deformed tunnels, the cracks of secondary lining around the crown, are induced by uneven pressure and immersion of legs of supports. To investigate the cause of these cracks, questionnaires were gathered on the situation of the lining with cracks. Subsequently, it is found that the cracks tend to occur in sections near tunnel entrances employing no reinforcement, and constructed in cold season. A thermal stress analysis was also performed considering of support loads and measurement results on concrete stress. The result showed that it is possible for thermal stress and drying shrinkage to produce the cracks.

**Key Words :** tunnel, NATM, secondary lining, crack, thermal stress

#### 1. 緒言

二次覆工の施工直後ないしは数年内に、コンクリートにひび割れが確認された例は幾つかある。既設トンネルの変状と対策については、従来から幾多の事例分析が行われ、その結果を踏まえてかなりの検討がなされているが<sup>1)</sup>、二次覆工に生じる代表的なひび割れは、材料や施工不良等に起因するものを除けば、その発生形態からトンネル縦断方向に生じるものと横断方向に生じるものに大別できよう。前者は、主にトンネル天端付近に見られるもので、外的な線荷重、偏荷重や脚部沈下がその発生原因だと考えられている。後者は、トンネル側壁から肩部にかけて見られることが多く、コンクリートの乾燥収縮や外気と地山の温度差に起因すると考えられている。しかし、外力の影響がほとんどないにもかかわらず、前者のような形態のひび割れが発生している事例は近年少くない。当初、偏荷重や脚部沈下などの外荷重が危惧されたが、事例検証（支保荷重やコンクリート応力等の調査・計測）より、外力の影響ばかりでなく、温度応力や乾燥収縮に起因するケースもあると考えられた<sup>2)</sup>。

本研究では、外力等の影響がなく、トンネル天端付近で縦断方向にひび割れが発生する原因について、理論的な考察を加えた。具体的には、まず非定常熱伝導解析を行い、二次覆工の厚み方向に生じる温度分布の経時変化について検討し、次に有限要素法による熱応力解析を実施して、覆工の厚み方向の温度分布により発生する熱応力とコンクリートの自重との相互作用によりひび割れの発生状況がどのように変化するか、さらに、型枠の早期脱型などによる強度不足がどの程度ひび割れ発生に影響を及ぼすかを検討した。

- 1) 正会員 工学博士 (株)ダイヤコンサルタント北日本支社札幌支店設計部
- 2) 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室
- 3) フェロー 工学博士 北海道大学大学院 工学研究科

## 2. トンネル天端部に生じる縦断ひび割れの実状

十数年内にNATMで施工された道路トンネルでも、前述のような天端部に縦断方向へ伸びたひび割れが発生しているのが幾つか確認された。その一例を図-1に示すが、各スパン毎に不連続で、坑口付近の無筋区間に多くみられる。従来のマニュアル等にあるひび割れパターンと変状原因から分類すれば、鉛直方向線状荷重を受けた場合や脚部沈下などに似ているが、次の調査結果から、主因は外力によるものではないと考えられた。

- 1) 吹付けコンクリートや支保工応力、二次覆工応力の計測結果から、外荷重の増加は認められない。
- 2) 鉛直方向線状荷重を受けた場合にはトンネル肩部に圧ぎ現象が生じるが、こういった傾向はない。

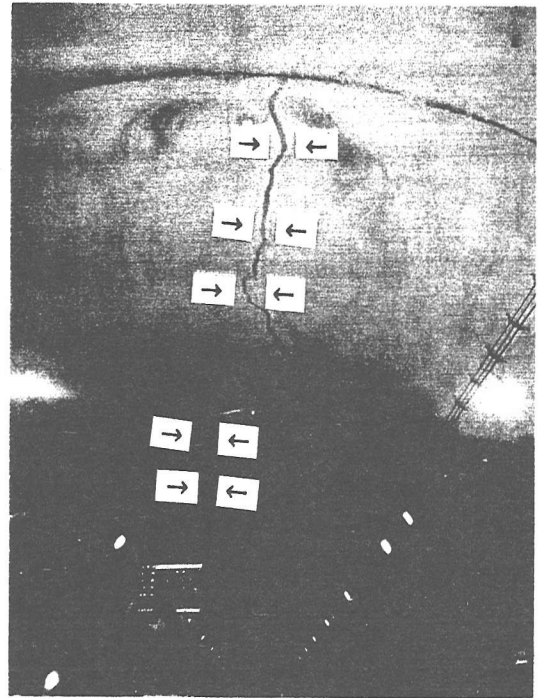


図-1 ひび割れ状況

## 3. 理論的考察

ひび割れの原因が外力や材質によらない場合、および施工不良等による影響を除けば、型枠の早期脱型による強度不足、温度応力、乾燥収縮などの要因が考えられる。このようなひび割れには、施工後1週間程度までに発生する初期発生型のものと、数週間ないしは2～4カ月で発生する中・長期発生型のものがあり、前者は、主としてコンクリートの硬化温度の低下によるものであり、後者は、コンクリートの乾燥収縮や寒冷期の温度低下に伴う収縮に起因するものと報告されている<sup>3)</sup>。

一般に、二次覆工は打設後12～18時間で脱型される。このため、脱型時の坑内温度が低い場合など、コンクリートの厚み方向に温度差が生じやすく、温度応力が悪影響を及ぼすと推定される。また、3 N/mm<sup>2</sup>程度の一軸圧縮強度があれば、アーチ形状で安定すると考えられるが、施工状況等により十分な強度が発現していない場合には、コンクリートの自重で変状をきたす恐れがあると考えられる。これより、コンクリートの打設・養生等の施工状態、坑内の温湿度・通風等の坑内環境の条件によっては、ひび割れが生じる可能性が高くなると推定されるため、以下に検討を加えた。

### (1) 脱型後に生じる二次覆工コンクリート内の温度差

打設から脱型後に至る、二次覆工コンクリートの厚み方向に生じる温度分布の経時変化について、水和熱を考慮した一次元非定常熱伝導解析を実施した。計算モデルは図-2に示す。計算ケースは、断熱材なし、断熱材 $t = 5$  cmおよび $t = 10$  cmの3通りについて、次のような温度条件をそれぞれ組み合わせた。

- 1) 打設温度 …… 15℃, 20℃, 25℃
- 2) 養生温度 …… 15℃ (一定)
- 3) 脱型後の温度 …… 0℃, 5℃, 10℃, 15℃

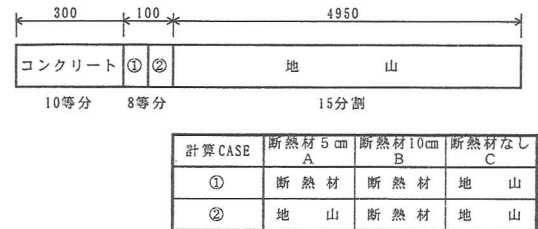


図-2 1次元非定常熱伝導解析モデル

この結果、図-3に示すように、断熱材のない場合にはコンクリート内外で最大数℃の温度差しか生じないのに対し、断熱材のある場合には10℃以上の温度差が生じる場合があった。断熱材厚は、5cm、10cmでほとんど差がなかった。なお、コンクリートの打設温度が高いほど、もしくは脱型後の温度が低いほど、この温度差は大きくなる傾向にあった。

温度ひび割れ指数による簡易な評価によれば、「軟質地盤上に打ち込まれたスラブ等のように内部拘束応力が卓越する場合」には、温度ひび割れ指数は、 $15/\Delta T_i$ （内部の最高温度時での内部と表面との温度差）で与えられる<sup>4)</sup>。覆工コンクリートの場合、防水シートがアイソレーション材としての役割を持つため、厚み方向には外部拘束よりも内部拘束的な応力が卓越するのではないかと推定される。

一般的な配筋の構造物における標準的な温度ひび割れ指数の参考値は、ひび割れを防止しない場合で1.5以上であることから、逆算すれば $\Delta T_i (\leq 10^\circ\text{C})$ が得られる。したがって、コンクリート内外で10℃以上の温度差があれば内部拘束的な熱応力により、ひび割れが生じる可能性があるものと考えられる。

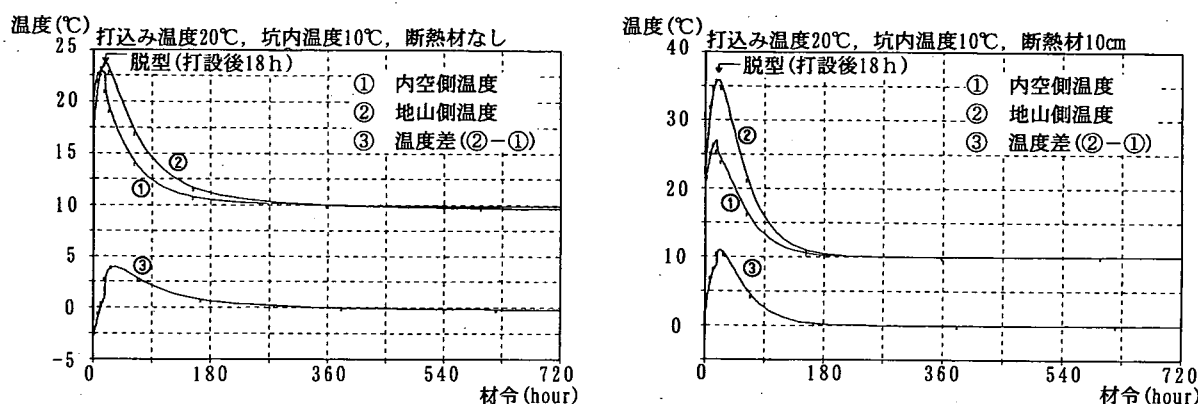


図-3 覆工コンクリート温度（内空側、地山側）の経時変化の一例

## (2)コンクリートの自重および温度応力の影響

脱型後に、覆工コンクリートの厚み方向の温度分布により発生する熱応力と自重との相互作用により、ひび割れが発生するかどうかを検討するため、FEMによる熱応力解析を行った。

解析モデルは、図-4に示すように、標準的な断面（縦横比80%）と扁平な断面（縦横比60%）の2断面を用いた。種々の入力物性値には一般的なものを用いたが、脱型時の脆弱なコンクリートについては、事例に基づき積算温度（ $M=360^\circ\text{C}\cdot\text{H}$ あるいは $M=480^\circ\text{C}\cdot\text{H}$ ）から推定した値を用いた。また、覆工コンクリートの厚み方向には非定常熱伝導解析より得た最大温度差の勾配を持たせた。

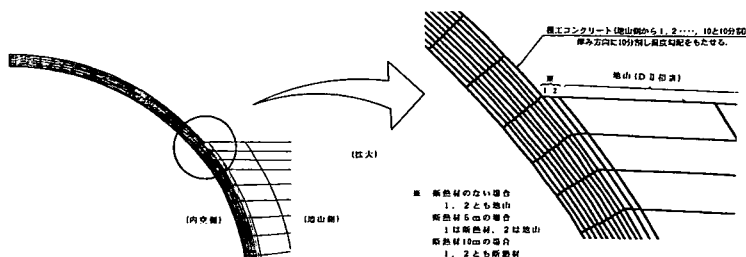


図-4 FEM解析モデル

ひび割れ発生の可能性については、覆工コンクリートの内空側天端部に着目し、ここで水平方向に生ずる最大引張応力( $\sigma_t$ )が引張強度( $\sigma_c$ )を超えるかどうかを、安全率( $F_s = \sigma_c / \sigma_t$ )により判定した。

強度、縦横比の大小、断熱材の有無、コンクリート内外の温度差の各ケースを組み合わせて、自重のみ、温度応力のみ、および相互影響のある場合について解析結果を表-1にまとめた。これより以下の知見を得た。

- 1) 温度応力は曲率の小さな標準断面の方が大きくなるが、自重の影響を考えれば、扁平断面の方がやや不利な結果となった。ただし、一部を除けば、自重のみや 10℃程度の温度差のみでは、内空側天端部に生ずる最大引張応力が許容範囲内に収まる。これらの応力が共に作用する場合(脱型時)には、安全率が1以下となった。
- 2) 断熱材のある場合の方が無い場合に比べ、やや不利な結果となった。これはコンクリート内外の温度差の影響もあるが、側壁部の反力剛性が低いために、自重により下方へたわみ、水平方向に膨らむような変形をした結果、天端部に大きな引張応力が作用したと考えられる。
- 3) コンクリート強度が十分に発現していない場合には、ひび割れが生じやすい結果となった。これも上記と同様の変形が生じ、元々許容応力が小さい上に、天端部に発生する引張応力が大きくなったものと考えられる。

以上のことから、二次覆工コンクリートの厚み方向に大きな温度差が生じた場合や、コンクリートの強度が小さい、あるいは側壁部の反力剛性が低い等の理由で自重により天端部が下方へたわみ水平方向に膨らむような変形をした場合、ひび割れが生じる可能性が高くなるものと考えられる。なお、まだ十分な強度を発現していないコンクリートの場合、クリープ変形が生じ破壊には至らないと考えられるが、その後の温度変化、乾燥収縮等の影響を受け、ひび割れが顕在化することが推測される。

表-1 応力解析結果一覧

| ① 標準断面(E=7,600N/mm <sup>2</sup> , C=1.00N/mm <sup>2</sup> , φ=30°, σ <sub>t</sub> =0.20N/mm <sup>2</sup> ) |      |          |          |         |                                         |                |                                         |                |                                          |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|----------|---------|-----------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|
| CASE                                                                                                       | 断熱材  | 打設温度(°C) | 坑内温度(°C) | 温度差(°C) | σ <sub>1</sub> (自重)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> | σ <sub>1</sub> (温度)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> | σ <sub>1</sub> (自+温)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> |
| 1                                                                                                          | なし   | 25       | 0        | 6.99    | 0.051                                   | 3.92           | 0.115                                   | 1.74           | 0.166                                    | 1.20           |
| 2                                                                                                          | 5cm  | 20       | 5        | 12.40   | 0.081                                   | 2.47           | 0.139                                   | 1.44           | 0.220                                    | 0.91           |
| 3                                                                                                          | 10cm | 15       | 15       | 7.30    | 0.098                                   | 2.04           | 0.077                                   | 2.60           | 0.175                                    | 1.14           |
| 4                                                                                                          | 10cm | 15       | 0        | 12.84   | 0.098                                   | 2.04           | 0.137                                   | 1.46           | 0.235                                    | 0.85           |
| 5                                                                                                          | 10cm | 25       | 0        | 16.65   | 0.098                                   | 2.04           | 0.182                                   | 1.10           | 0.280                                    | 0.71           |

| ② 扁平断面(E=7,600N/mm <sup>2</sup> , C=1.00N/mm <sup>2</sup> , φ=30°, σ <sub>t</sub> =0.20N/mm <sup>2</sup> ) |      |          |          |         |                                         |                |                                         |                |                                          |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|----------|---------|-----------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|
| CASE                                                                                                       | 断熱材  | 打設温度(°C) | 坑内温度(°C) | 温度差(°C) | σ <sub>1</sub> (自重)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> | σ <sub>1</sub> (温度)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> | σ <sub>1</sub> (自+温)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> |
| 1                                                                                                          | なし   | 25       | 0        | 6.99    | 0.029                                   | 6.90           | 0.111                                   | 1.80           | 0.140                                    | 1.43           |
| 2                                                                                                          | 5cm  | 20       | 5        | 12.40   | 0.087                                   | 2.30           | 0.092                                   | 2.17           | 0.179                                    | 1.12           |
| 3                                                                                                          | 10cm | 15       | 15       | 7.30    | 0.104                                   | 1.92           | 0.075                                   | 2.67           | 0.179                                    | 1.12           |
| 4                                                                                                          | 10cm | 15       | 0        | 12.84   | 0.104                                   | 1.92           | 0.134                                   | 1.49           | 0.238                                    | 0.84           |
| 5                                                                                                          | 10cm | 25       | 0        | 16.65   | 0.104                                   | 1.92           | 0.177                                   | 1.13           | 0.281                                    | 0.71           |

| ③ 標準断面(E=6,400N/mm <sup>2</sup> , C=0.75N/mm <sup>2</sup> , φ=30°, σ <sub>t</sub> =0.15N/mm <sup>2</sup> ) |      |          |          |         |                                         |                |                                         |                |                                          |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|----------|---------|-----------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|
| CASE                                                                                                       | 断熱材  | 打設温度(°C) | 坑内温度(°C) | 温度差(°C) | σ <sub>1</sub> (自重)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> | σ <sub>1</sub> (温度)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> | σ <sub>1</sub> (自+温)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> |
| 1                                                                                                          | なし   | 25       | 0        | 6.99    | 0.037                                   | 4.05           | 0.096                                   | 1.56           | 0.133                                    | 1.13           |
| 2                                                                                                          | 5cm  | 20       | 5        | 12.40   | 0.069                                   | 2.17           | 0.115                                   | 1.30           | 0.184                                    | 0.82           |
| 3                                                                                                          | 10cm | 15       | 15       | 7.30    | 0.087                                   | 1.72           | 0.064                                   | 2.34           | 0.151                                    | 0.99           |
| 4                                                                                                          | 10cm | 15       | 0        | 12.84   | 0.087                                   | 1.72           | 0.115                                   | 1.30           | 0.202                                    | 0.74           |
| 5                                                                                                          | 10cm | 25       | 0        | 16.65   | 0.087                                   | 1.72           | 0.152                                   | 0.99           | 0.239                                    | 0.63           |

| ④ 扁平断面(E=6,400N/mm <sup>2</sup> , C=0.75N/mm <sup>2</sup> , φ=30°, σ <sub>t</sub> =0.15N/mm <sup>2</sup> ) |      |          |          |         |                                         |                |                                         |                |                                          |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|----------|---------|-----------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|
| CASE                                                                                                       | 断熱材  | 打設温度(°C) | 坑内温度(°C) | 温度差(°C) | σ <sub>1</sub> (自重)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> | σ <sub>1</sub> (温度)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> | σ <sub>1</sub> (自+温)(N/mm <sup>2</sup> ) | F <sub>s</sub> |
| 1                                                                                                          | なし   | 25       | 0        | 6.99    | 0.050                                   | 3.00           | 0.096                                   | 1.56           | 0.146                                    | 1.03           |
| 2                                                                                                          | 5cm  | 20       | 5        | 12.40   | 0.056                                   | 2.68           | 0.112                                   | 1.34           | 0.168                                    | 0.89           |
| 3                                                                                                          | 10cm | 15       | 15       | 7.30    | 0.097                                   | 1.55           | 0.064                                   | 2.34           | 0.161                                    | 0.93           |
| 4                                                                                                          | 10cm | 15       | 0        | 12.84   | 0.097                                   | 1.55           | 0.115                                   | 1.30           | 0.212                                    | 0.71           |
| 5                                                                                                          | 10cm | 25       | 0        | 16.65   | 0.097                                   | 1.55           | 0.152                                   | 0.99           | 0.249                                    | 0.60           |

注) 1. (自重), (温度), (自+温)は、それぞれ自重のみ、温度のみ、および両方の条件を考慮した解析結果を示している。  
2. \*はF<sub>s</sub><1.00で、許容応力を越えていることを示す。ただし、1N/mm<sup>2</sup>≒10kgf/cm<sup>2</sup>。

4. ひび割れ発生要因の検討とその対策

(1) 二次覆工施工時およびその後の坑内環境の検討

解析結果より、二次覆工施工時の状況(打設温度、養生温度、打設～脱型までの時間など)およびその後の坑内温度等により、脱型後のコンクリートの強度、内部の温度分布状況が決定されるものと推定される。特に坑内温度状況は、ひび割れ発生要因の一つになり得ると考えられるが、下記に挙げられる項目により大きく影響される。

- 1) 構造条件……トンネル延長や断面形状、施工状況(工区分け、掘削・覆工の進捗状況、遮蔽扉やシートの設置状況)など。

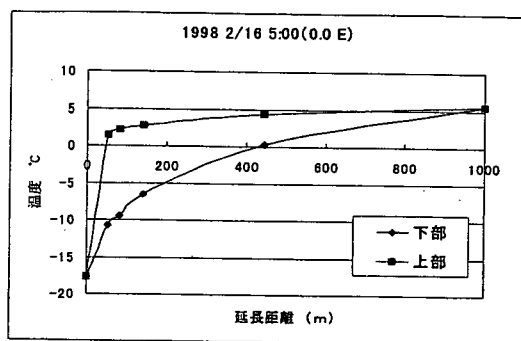
2) 気象条件……外部気温、風速・風向、両坑口の気圧差など。

3) 地形条件……標高、地形、トンネル方向、位置などにより、気象条件に大きく影響する。

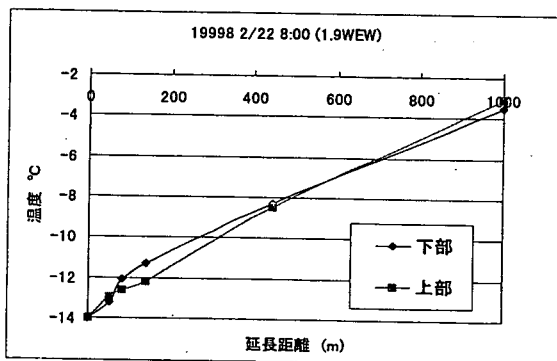
坑内温度が外部気温や風速・風向によってどのような影響を受けるかについての計測事例として、北海道の某トンネル（延長 $L=2,400\text{m}$ ）での、施工中（掘削～覆工）およびその後の坑内温度計測結果の一部を示す<sup>5)</sup>。なお、本計測は断熱材の設置条件を確認するために実施されたもので、ひび割れとは直接関係ない。

図-5は、起終点坑口および起点から約50m、80m、140m、450m、1000m地点における坑内温度（上部は高さ $h=5.0\text{m}$ 、下部は $h=1.5\text{m}$ の計測位置）を示しており、(a)、(b)は互いに風速・風向の異なる日の坑内温度分布で、(c)、(d)にそれぞれ想定された坑内風の流れを模式的に示した。当トンネルの起点側坑口は西北西に面しているが、厳寒期（1～2月）には無風あるいはWNW方向以外の風の日が多く(a)のような状況であったが、12月や3月にはWNW系の風が顕著で(b)に示す温度分布となっていた。

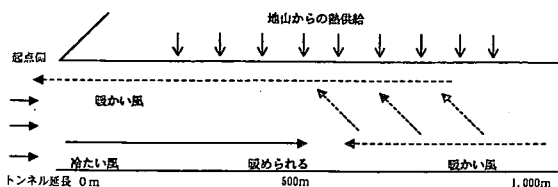
これより、坑内の温度分布は、トンネルの構造、気象や地形の条件により大きく影響を受けることがわかる。また、施工状況（掘削～覆工の進捗状況、遮蔽扉・シート設置状況など）にも影響を受ける。短いトンネルであれば、覆工施工時あるいは直後に寒風が吹き抜ける可能性があり、内空側が急冷されて二次覆工厚み方向に大きな温度差を生じ、ひび割れ発生の可能性もあり得る。



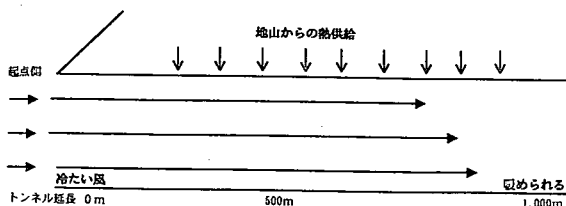
(a)



(b)



(c)



(d)

図-5 風速・風向の違いによる坑内温度分布状況(a, b)と、想定された坑内風の流れ(c, d)

## (2) ひび割れ発生要因の検討とその対策

近年施工されたトンネルに見られる天端部に縦断方向へ伸びるひび割れの発生原因について、実状調査および解析を実施し、外力がない場合には、温度応力や乾燥収縮等が要因となり得るとの検討結果が得られた。

施工不良や材料によるもの以外に、自重やコンクリート強度が影響因子となることから、強度に直接関与すると考えられる次の6つのパラメータに着目し、各々について検討した。

1) 扁平率：FEM等の解析結果から、扁平な程、自重の影響を受けやすい。温度応力の影響は、曲

率が小さい程大きくなる傾向があり、扁平断面ではやや有利な結果を得た。

2) 覆工厚：別途行ったフレーム解析では、覆工厚が大きくなれば自重増加の影響もあり、やや不利な結果となった。

3) 断熱材：水和熱を断熱する効果により、覆工コンクリート内外の温度差が大きくなり、強度条件にもよるが約 10℃以上の温度差でひび割れが発生する可能性はある。また反力剛性の低下により、トンネル断面が水平方向に膨らむ変形を許容するため、自重によって生じる天端部の引張応力を増大させる。上記の温度応力とともに作用した場合、悪条件が揃えばひび割れが生じる可能性もあり得る。

4) 脱型時間：養生温度と脱型時間はコンクリート強度に大きく影響する。一般に、最小強度（一軸圧縮強度  $\sigma_c = 3 \text{ N/mm}^2$ ）で管理されているが、坑内温度状況等に影響を受け、ひび割れが起こり得る可能性はある。

坑内温度が低い場合（坑口付近や短いトンネル、貫通後など）には、コンクリート強度を増大・安定させるのに、脱型時間を通常より長くする工夫もひび割れ抑制に効果があるだろう。

5) 打設温度：コンクリートの打設温度は、断熱材がある場合や坑内温度の低い場合には、脱型後に大きな温度差をもたらすため、坑内温度を考慮してやや低めに設定することが望ましい。

6) 脱型後の温度：坑内温度が低い場合（坑口付近や短いトンネル、貫通後など）には、脱型後の覆工コンクリート内空側で急激に温度が低下するため、大きな温度差を生じ、ひび割れが生じる可能性が高くなる。

以上のように、打設温度や養生温度、脱型の温度管理が重要となるほか、乾燥収縮によるひび割れの恐れもあるため、さらに次のような留意点が挙げられる。

1) 厳寒期における養生においては、ジェットヒータ等による加熱が温度や乾燥の影響を与える可能性が高いので、脱型後の温湿度変化が大きくなるように、十分な管理が必要である。

2) 坑口付近や短いトンネル、貫通後などでは、温度低下とともに覆工表面が乾燥し、打設後 1～2 年経過した後でもひび割れが発生した事例があるので注意を要する。

3) 上記のような場合には、施工条件（遮閉扉などの設置）、工程などの検討が必要である。

## 5. 結言

トンネルの天端部で縦断方向に伸びるひび割れの発生原因は、実状調査、解析的検討等から、温度応力や乾燥収縮に起因するものも一つの要因として挙げられることが推定された。自重やコンクリート強度も影響因子に挙げられ、打設や脱型後の温度条件等の施工状況や坑内環境の影響が大きいと考えられた。

今後、現行トンネルのひび割れ調査に加え、施工予定のトンネルの着工～完成までの調査・計測、さらに対策工として、鋼繊維コンクリートや金網等の使用や、コンクリートの品質改良などの試験施工などを実施することが必要であろう。

## 【参考文献】

- 1) 例えば、鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル, pp.174-179, 1998
- 2) 中井ら：土木学会北海道支部論文報告集第 54 号 (A), I - 72, pp.344-347, 1998
- 3) 日本鉄道建設公団：N A T M 設計施工指針, pp.206-207, 1996
- 4) 土木学会：[平成 8 年制定] コンクリート標準示方書，施工編，pp.182-183，1996
- 5) 北海道土木技術会トンネル研究委員会凍結防止分科会：平成 10 年度活動報告，pp.35，1999