

# 大規模開削トンネルのひび割れ調査結果と 温度応力解析結果の比較と一考察

平井 祐貴<sup>1</sup>・大石敬司<sup>2</sup>・岩波 基<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻（〒940-8532新潟県長岡市西片貝町888）

E-mail: ac20834k@st.nagaoka-ct.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京地下鉄（株）鉄道本部 改良建設部（〒110-8614東京都台東区東上野3-19-6）

<sup>3</sup>正会員 博（工） 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科（〒940-8532新潟県長岡市西片貝町888）

東京メトロ副都心線の新宿三丁目駅は、大規模かつ複雑な構造を開削工法によって構築されたトンネルである。これまで、比較的小規模で単純な構造のボックスカルバートについて、温度応力解析結果と実際のひび割れ発生状況とを比較した上で、解析方法が適切であることを検討した事例は数種類ある。しかし、当該トンネルのような大規模かつ複雑な構造のボックスカルバートについて施工完了後に再計算を行い、ひび割れ調査結果と比較を行った事例は少ない。

本論文では、同駅トンネル構造物のうち、打設ブロック9および打設ブロック10での詳細なひび割れ調査結果と3次元温度応力解析結果を比較し、考察を加えたものである。

**Key Words :** temperature stress, crack, cut and cover tunnel

## 1. はじめに

東京メトロ副都心線は2008年6月14日に開業した、和光市と渋谷を結ぶ運行区間全長約20.2kmの路線である。建設区間は池袋から渋谷間の約8.9kmで、その区間内にある新宿三丁目駅は開削工法で構築されたトンネルである。

地下鉄道の構造物には、主として開削トンネルとシールドトンネルがある。東京メトロにおいては、約160kmの地下区間のうち約6割の約100kmが開削トンネルであり、同トンネルに対する適切な維持管理手法の確立が重要な課題となってくる。コンクリートの材料、施工、環境に起因する変状は硬化時の水和熱、乾燥収縮といった初期材齢時の材料特性に基づくひび割れに支配される。

本工事のような大規模開削トンネル地下構造物は、水和反応による温度応力ひび割れが発生することが多い。そこで、施工前に解析を行い、ひび割れ発生の確率とひび割れ幅を推定した上で、対策案を行うことが多い。しかし、夢洲トンネル咲洲側アプローチ部築造工事（その6）においては、施工前の解析結果と計測データを用いた事後の解析結果そして実際のひび割れ状況に乖離が見られた。特に、実際には温度応力に起因していると見られるひび割れは発生しなかったにもかかわらず、実測の

打設温度と外気温のデータを用いた解析ではひび割れ指数が90%以上発生する値となった<sup>1)</sup>。

このように施工後の調査が行われた実績は少なく、旧首都高速道路公団川崎縦貫線大師工区と大宮工区<sup>2)</sup>や旧阪神高速道路公団<sup>3)</sup>の比較的単純な構造のボックスラーメンや温度応力解析とひび割れ発生状況の比較検討がなされ、みなとみらい21線北仲駅<sup>4)</sup>などについては温度ひび割れ対策について報告が行われてきた。しかし、今回の工事のような大規模かつ複雑な構造のボックスラーメンについて施工完了後に再計算を行い、ひび割れ調査結果と比較を行った事例は少ない。

そこで、初期材齢時の変状の実態や特徴を把握するために、副都心線に複数ある開削トンネル工区から一箇所を選定し、施工初期のひび割れ調査を実施した。本論文は、同駅トンネル構造物のうち、BL9およびBL10での詳細なひび割れ調査結果と3次元温度応力解析を比較し、考察を加えたものである。

## 2. 対象構造物の説明

### (1) 構造寸法

図-1に示すように、解析に使用した新宿三丁目駅内のBL9からBL10にまたがる柱⑬～⑯は2層3径間のボックス

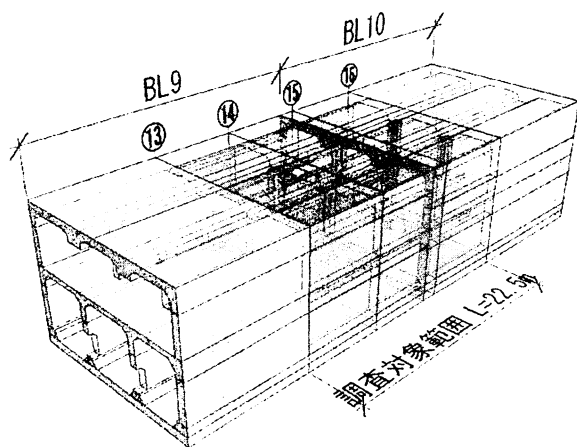


図-1 対象躯体の概要

ラーメン構造を有しており、1層部（B1F）は柱構造、2層部（B2F）は中壁構造となっている。外側寸法は約17m×14m、B2側壁、下床版の厚さは800mm、B1側壁、上床版の厚さは700mmとなっており、マッシュなコンクリートであるといえる。

## (2) 材料条件

事前のひび割れ抑制方法に関する検討により、下床版とB2側壁ハンチ、中壁ハンチには高炉セメントB種が採

用れた。その他の箇所には、普通ポルトランドセメントが用いられている。各打設箇所の配合条件を表-1に示す。

## (3) 施工条件

図-1の断面部分の構築は2005年4月から2006年1月にかけて行われた。型枠には合板を使用し材齢3日で脱型した。各ブロックごとの打設順、打設箇所、実際の打設日および打設温度を表-2に示す。また、躯体断面における各打設箇所を図-2に示す。図の左半分がBL10、右半分がBL9を示している。

## 3. 解析条件

解析は、まず温度解析を行い、解析モデル全要素の温度の変化を求める。その後、温度解析結果をもとに温度応力解析を行い、各要素のひずみ差からそれぞれの要素に発生する応力を算出する。

なお、コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>によれば、コンクリート供試体の引張強度と構造物中の引張主応力の比をひび割れ指数と定義し、ひび割れ発生の有無は、ひび割れ発生確率の限界値から定められるひび割れ指数によって照査するものと定められている。ひび割れ指数は以下の

表-1 配合条件

| BL | No       | 打設箇所                | 配合       | セメント量<br>kg/m <sup>3</sup> | 水セメント比<br>% | BL | No        | 打設箇所                | 配合      | セメント量<br>kg/m <sup>3</sup> | 水セメント比<br>% |
|----|----------|---------------------|----------|----------------------------|-------------|----|-----------|---------------------|---------|----------------------------|-------------|
| 10 | 1        | 下床版                 | 24-15BB  | 290.0                      | 55.0        | 9  | 1         | 下床版                 | 24-15BB | 308.0                      | 55.0        |
|    | 2        | B2側壁ハンチ・<br>B2中壁ハンチ |          | 308.0                      | 52.0        |    | 2         | B2側壁ハンチ・<br>B2中壁ハンチ |         | 290.0                      | 52.0        |
|    | 3        | B2中壁                | 24-15N   | 290.0                      | 55.0        |    | 3         | B2中壁                | 24-15N  | 291.0                      | 55.0        |
|    | 4        | B2側壁                |          | 4-1                        |             |    | B2側壁(B線)  | 290.0               |         |                            |             |
|    | 5        | 中床版                 |          | 4-2                        |             |    | B2側壁(A線)  | 291.0               |         |                            |             |
|    |          |                     |          | 5                          |             |    | 中床版       | 290.0               |         |                            |             |
|    |          |                     |          | 6                          |             |    | B1側壁・B1中柱 | 291.0               |         |                            |             |
| 7  | 上床版・B1側壁 | 7                   | 上床版・B1側壁 |                            |             |    |           |                     |         |                            |             |

表-2 打設日および打設箇所

| BL | No | 打設日      | 打設箇所            | 打設温度<br>℃ | BL | No  | 打設日       | 打設箇所            | 打設温度<br>℃ |
|----|----|----------|-----------------|-----------|----|-----|-----------|-----------------|-----------|
| 10 | 1  | H17.4.15 | 下床版             | 20.7      | 9  | 1   | H17.6.28  | 下床版             | 31.7      |
|    | 2  | H17.4.23 | B2側壁ハンチ・B2中壁ハンチ | 19.0      |    | 2   | H17.7.7   | B2側壁ハンチ・B2中壁ハンチ | 28.0      |
|    | 3  | H17.6.14 | B2中壁            | 26.0      |    | 3   | H17.9.3   | B2中壁            | 30.0      |
|    | 4  | H17.6.23 | B2側壁            | 24.0      |    | 4-1 | H17.9.17  | B2側壁(B線)        | 27.0      |
|    | 5  | H17.7.29 | 中床版             | 30.7      |    | 4-2 | H17.9.22  | B2側壁(A線)        | 27.0      |
|    | 6  | H17.9.30 | B1側壁・B1中柱       | 24.0      |    | 5   | H17.10.20 | 中床版             | 21.8      |
|    | 7  | H17.12.1 | 上床版・B1側壁        | 14.3      |    | 6   | H17.12.8  | B1側壁・B1中柱       | 10.7      |
|    |    |          |                 |           |    | 7   | H18.1.17  | 上床版・B1側壁        | 12.3      |

式(1)のように定義される。

$$I_a(t) = f_{tk}(t) / \sigma_{tk}(t) \quad (1)$$

ここに、 $I_a(t)$  : ひび割れ指数

$f_{tk}(t)$  : 材齢t日におけるコンクリート引張強度

$\sigma_{tk}(t)$  : 材齢t日におけるコンクリート最大主引張応力度

また、本解析では解析コードに ASTEA-MACS の Ver.5 を用いた。

## (1) コンクリートの各物性値

コンクリートの熱物性値および力学的物性はコンクリート標準示方書<sup>5)</sup>に準じて表-3のように設定した。

また、本研究では、一般的な乾燥収縮を考慮しない場合の解析の他に、乾燥収縮を考慮した場合の解析も行った。乾燥収縮を考慮する際には、コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>より、コンクリートの環境条件と乾燥開始材齢から、最終ひずみ量を推定し、350 $\mu$ に設定した。各材齢時の乾燥収縮量は、式(2)を用いて求めた。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = \left[ 1 - \exp \left\{ -0.108(t - t_0)^{0.56} \right\} \right] \cdot \varepsilon'_{sh} \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$  : コンクリートの材齢  $t_0$  から  $t$  までの収縮ひずみ

$t_0$  および  $t$  : 乾燥開始時および乾燥中のコンクリートの有効材齢

$\varepsilon'_{sh}$  : 収縮ひずみの最終値

## (2) 解析モデルおよび温度境界条件、拘束条件

解析に用いた3次元モデルを図-3に示す。この3次元モデルの要素数は75295、接点数は92920である。

下床版の土への熱伝達の状況や、土から受ける外部拘束を考慮するため、地盤を考慮した解析を行った。

温度境界条件は、各打設工程において、その打設箇所の上は直接外気と接する熱伝達境界として評価した。

表-4 熱伝達境界条件

| 養生方法 | $\eta(\text{W/m}^2\text{°C})$ |
|------|-------------------------------|
| 空気   | 14                            |
| 合板   | 8                             |

表-5 外気温

| 月 | 気温(°C) | 月  | 気温(°C) |
|---|--------|----|--------|
| 1 | 5.8    | 7  | 25.4   |
| 2 | 6.1    | 8  | 27.1   |
| 3 | 8.9    | 9  | 23.5   |
| 4 | 14.4   | 10 | 18.2   |
| 5 | 18.7   | 11 | 13.0   |
| 6 | 21.8   | 12 | 8.4    |

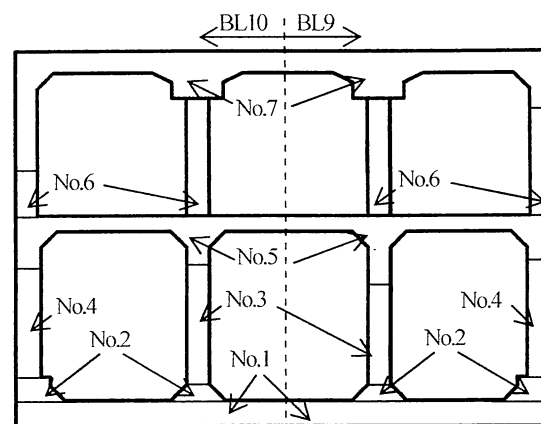


図-2 各打設箇所

表-3 コンクリートの熱物性値および力学特性

| セメントの種類                                              | 普通ポルトランドセメント                                                 | 高炉セメントB種                       |       |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------|
|                                                      |                                                              | 下床版                            | B2ハンチ |
| 熱伝導率                                                 | W/m°C                                                        | 2.7                            |       |
| 比熱                                                   | KJ/kg°C                                                      | 1.15                           |       |
| 密度                                                   | kg/m <sup>3</sup>                                            | 2400                           |       |
| 断熱温度上昇量                                              | °C                                                           | $Q=K(1-\exp(-\alpha \cdot t))$ |       |
| 打設温度                                                 |                                                              | 採用値                            |       |
| K : 終局断熱温度上昇量                                        | 10                                                           | 45.80                          | 47.88 |
|                                                      | 20                                                           | 44.90                          | 45.80 |
|                                                      | 30                                                           | 43.90                          | 44.00 |
| $\alpha$ : 上昇速度に関する定数                                | 10                                                           | 0.570                          | 0.504 |
|                                                      | 20                                                           | 1.066                          | 0.997 |
|                                                      | 30                                                           | 1.497                          | 1.140 |
| $f_c(t)$ : 材齢 $t$ 日のコンクリートの圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_c'(t) = \frac{t}{a+bt} f_c'(91)$                          |                                |       |
|                                                      | a                                                            | 4.5                            | 6.2   |
|                                                      | b                                                            | 0.95                           | 0.93  |
| $f_t(t)$ : 材齢 $t$ 日のコンクリートの引張強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_t'(91)$                                                   | 24                             | 24    |
| $E_c(t)$ : 材齢 $t$ 日における有効ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )  | $E_c(t) = 0.44 \cdot \sqrt{f_c(t)}$                          |                                |       |
|                                                      | $\varphi(t)$ : 温度上昇時におけるクリープの影響が大きいことによるヤング係数の補正係数           |                                |       |
|                                                      | 材齢3日まで $\varphi=0.73$<br>材齢5日以降 $\varphi=1.0$<br>材齢3~5日は直線補間 |                                |       |

また、側壁と上床版、中床版の打設工程において、それらの下面および側面は、打設後3日目まで合板の熱伝達条件を考慮し、その後は外気と接するものとして熱伝達境界を設けて解析を実施した。表-4はそれぞれの熱伝達率  $\eta$  を示している。

また、外気温は、坑内温度の測定結果がなく、また、

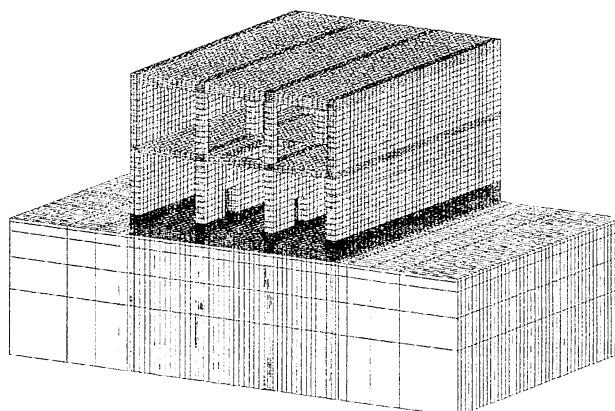


図-3 解析モデル

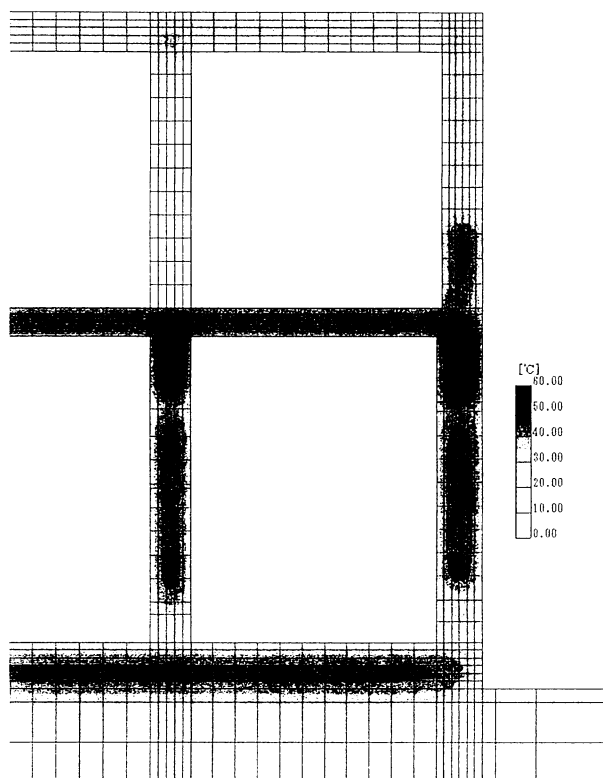


図-4 BL10 中央断面における最高温度分布図

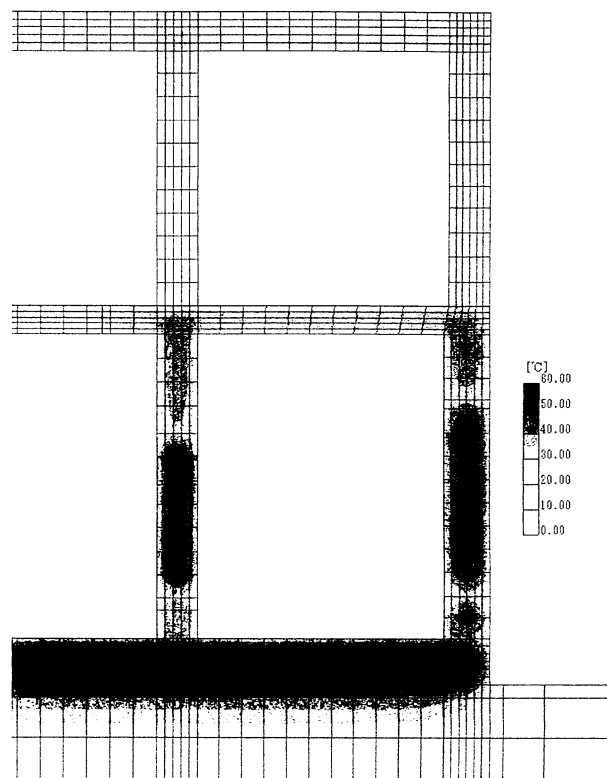


図-5 BL9 中央断面における最高温度分布図

表-6 各打設箇所での最高温度

| BL | No | 打設箇所                | 最高温度<br>℃ | 経過日数<br>日 | BL | No  | 打設箇所                | 最高温度<br>℃ | 経過日数<br>日 |
|----|----|---------------------|-----------|-----------|----|-----|---------------------|-----------|-----------|
| 10 | 1  | 下床版                 | 46.0      | 1.6       | 9  | 1   | 下床版                 | 58.4      | 75.1      |
|    | 2  | B2側壁ハンチ・<br>B2中壁ハンチ | 35.6      | 8.9       |    | 2   | B2側壁ハンチ・<br>B2中壁ハンチ | 48.3      | 83.8      |
|    | 3  | B2中壁                | 34.4      | 60.6      |    | 3   | B2中壁                | 53.2      | 141.8     |
|    | 4  | B2側壁                | 49.5      | 70.1      |    | 4-1 | B2側壁(B線)            | 52.4      | 156.0     |
|    | 5  | 中床版                 | 56.8      | 105.9     |    | 4-2 | B2側壁(A線)            | 52.1      | 161.0     |
|    | 6  | B1側壁・B1中柱           | 46.8      | 169.0     |    | 5   | 中床版                 | 45.5      | 189.0     |
|    | 7  | 上床版・B1側壁            | 35.6      | 231.4     |    | 6   | B1側壁・B1中柱           | 27.3      | 238.4     |
|    |    |                     |           |           |    | 7   | 上床版・B1側壁            | 30.9      | 278.4     |

比較的換気が行われている大規模な地下空間では外気温との差が小さい実績から<sup>9)</sup>、東京のアメダスデータより表-5に示すとおりに設定した。

また、図-3に示した解析モデルの、地盤底面全体を上下方向に拘束し、地盤底面の一辺を水平方向に拘束、さらに水平方向を拘束した一辺の一端を奥行き方向に拘束した状態で応力解析を行った。

#### 4. 解析結果およびひび割れ調査との比較

解析の計算時間は、乾燥収縮を考慮しない場合、する場合の両ケースで、それぞれ約96時間であった。

#### (I) 温度解析結果

BL10の中央断面における最高温度分布図を図-4に、BL9の中央断面における最高温度分布図を図-5に示す。これらの分布図は、ステップ解析を行い、各要素における最高温度の結果を示したものである。したがって、要素によって表示している最高温度の発生時刻が異なる。なお、断面方向においてほぼ左右対称の計算結果が得られたので、その半分のみを表示している。

また、解析モデルにおいて、各打設箇所での最高温度の集中した、それぞれの打設ブロック中央断面における各打設箇所の最高温度をまとめたものを表-6に示す。

図-4を見ると、BL10では中床版の温度が非常に高くなっており、表-6より、最高温度が56.8℃を示していることがわかる。また、図-5を見ると、BL9では下床版で

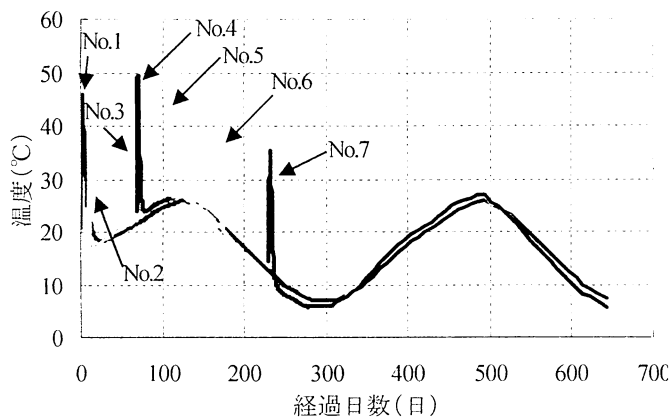


図-6 BL10の温度の経時変化

非常に温度が高くなっており、表-6より58.4℃を示していることがわかる。これは表-2から両方とも夏季に打設し、打設温度が30℃以上であるためである。

BL10における温度の経時変化を図-6に、BL9における温度の経時変化を図-7に示す。経過日数は解析開始を0

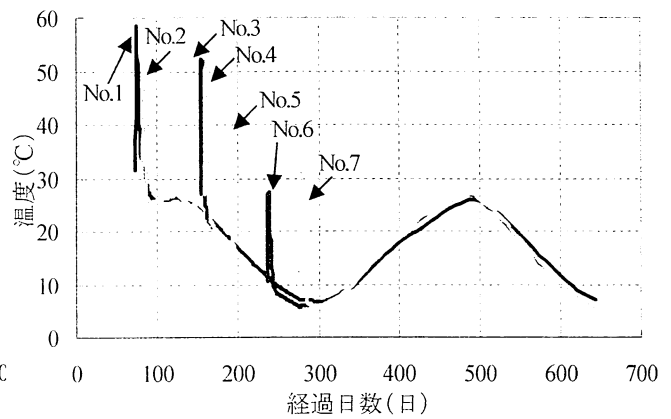


図-7 BL9の温度の経時変化

日としている。

これらの図を見ると、どの打設箇所も打設後1～2日程度で最高温度に達していることがわかる。

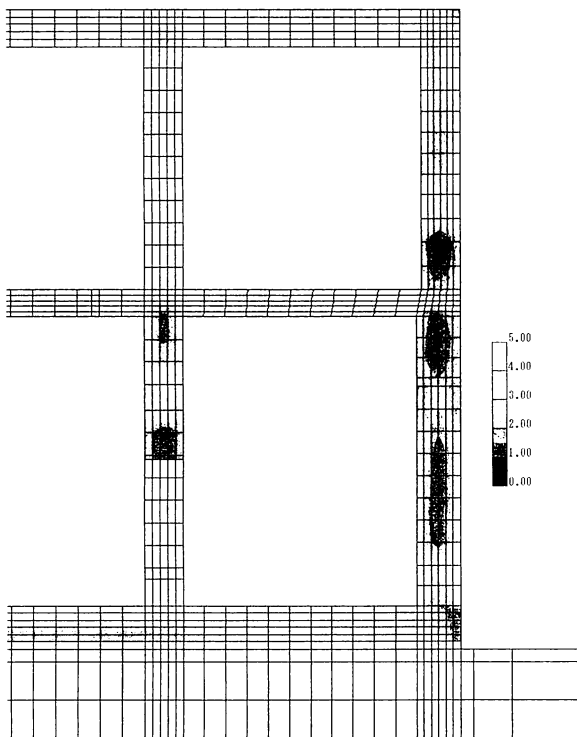


図-8 BL10 中央断面における最小ひび割れ指数分布図(乾燥収縮を考慮しない場合)

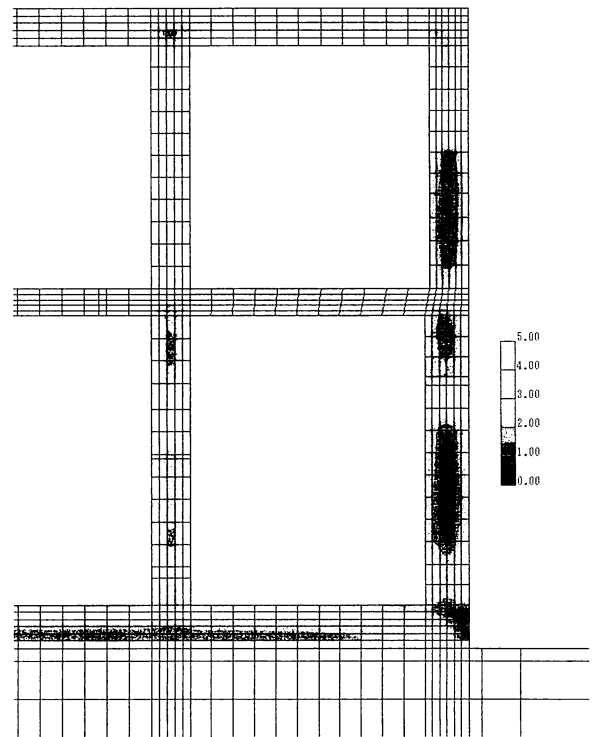


図-9 BL9 中央断面における最小ひび割れ指数分布図(乾燥収縮を考慮しない場合)

表-7 各打設箇所の最小ひび割れ指数(乾燥収縮を考慮しない場合)

| BL | No | 打設箇所            | 最小ひび割れ指数 | 経過日数<br>日 | BL | No  | 打設箇所            | 最小ひび割れ指数 | 経過日数<br>日 |
|----|----|-----------------|----------|-----------|----|-----|-----------------|----------|-----------|
| 10 | 1  | 下床版             | 1.47     | 1.5       | 9  | 1   | 下床版             | 0.93     | 75.3      |
|    | 2  | B2側壁ハンチ・B2中壁ハンチ | 1.88     | 69.7      |    | 2   | B2側壁ハンチ・B2中壁ハンチ | 2.15     | 160.5     |
|    | 3  | B2中壁            | 1.36     | 105.7     |    | 3   | B2中壁            | 1.64     | 188.8     |
|    | 4  | B2側壁            | 1.52     | 106.0     |    | 4-1 | B2側壁(B線)        | 1.19     | 188.9     |
|    | 5  | 中床版             | 1.35     | 169.0     |    | 4-2 | B2側壁(A線)        | 1.17     | 188.9     |
|    | 6  | B1側壁・B1中柱       | 1.23     | 231.1     |    | 5   | 中床版             | 1.56     | 238.0     |
|    | 7  | 上床版・B1側壁        | 2.10     | 453.0     |    | 6   | B1側壁・B1中柱       | 1.45     | 278.3     |
|    |    |                 |          |           |    | 7   | 上床版・B1側壁        | 1.76     | 289.0     |

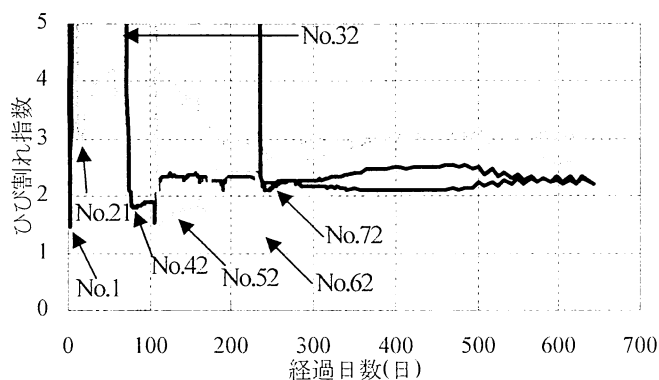


図-10 BL10 ひび割れ指数の経時変化(乾燥収縮を考慮しない場合)

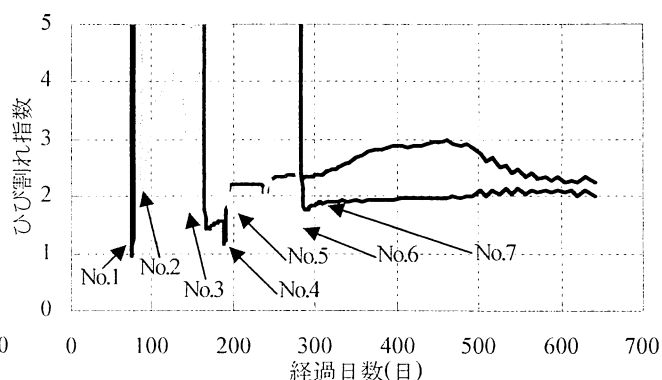


図-11 BL9 ひび割れ指数の経時変化(乾燥収縮を考慮しない場合)

### (2) 乾燥収縮を考慮しない場合の温度応力解析結果

BL10の中央断面における最小ひび割れ指数分布図を図-8に、BL9の中央断面における最小ひび割れ指数分布図を図-9に示す。これらの分布図は、温度解析と同様にステップ解析を行い、各要素における最高温度の結果を示したものである。したがって、要素によって時刻が異なる。なお、このケースにおいても断面方向においてほぼ左右対称の計算結果が得られたので、その半分のみを表示した。図-8および図-9の断面には、各打設箇所での最小ひび割れ指数が集中している。

また、図-8および図-9における各打設箇所の最小ひび割れ指数をまとめたものを表-7に示す。

図-8および表-7より、BL10において、下床版では最小ひび割れ指数0.93を示したものの、そのほかの打設箇所

では1以上となっている。この結果はひび割れ発生確率が低いと推測されるものである。

図-9と表-7より、BL9ではどの打設箇所でもひび割れ指数1以下になることはなく、BL10と同様にひび割れ発生確率が低い結果となった。

BL10におけるひび割れ指数の経時変化を図-10にBL9における温度の経時変化を図-11に示す。これらのグラフを見ると、どの打設箇所も、打設直後または直上のリフトを打設した際に最小ひび割れ指数を示していることがわかる。

### (3) 乾燥収縮を考慮した場合の温度応力解析結果

BL10の中央断面における最小ひび割れ指数分布図を図-12に、BL9の中央断面における最小ひび割れ指数分布図

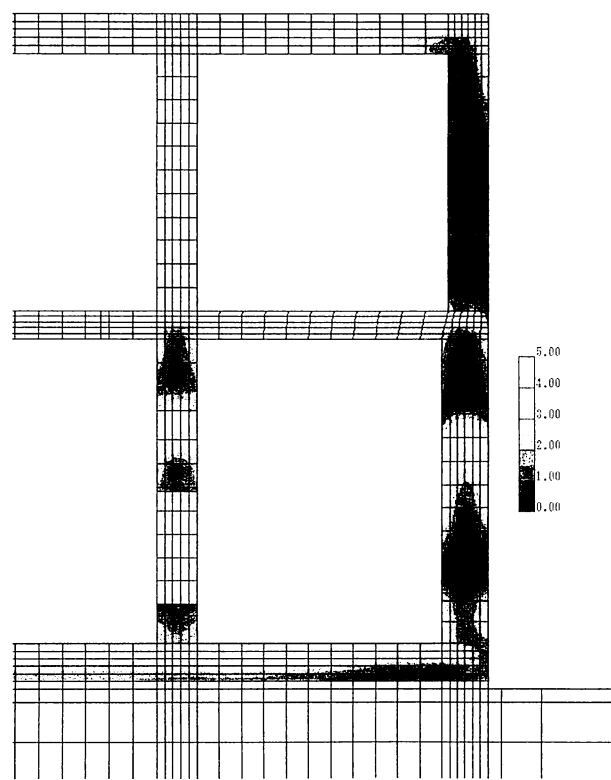


図-12 BL10 中央断面における最小ひび割れ指数分布図(乾燥考慮あり)

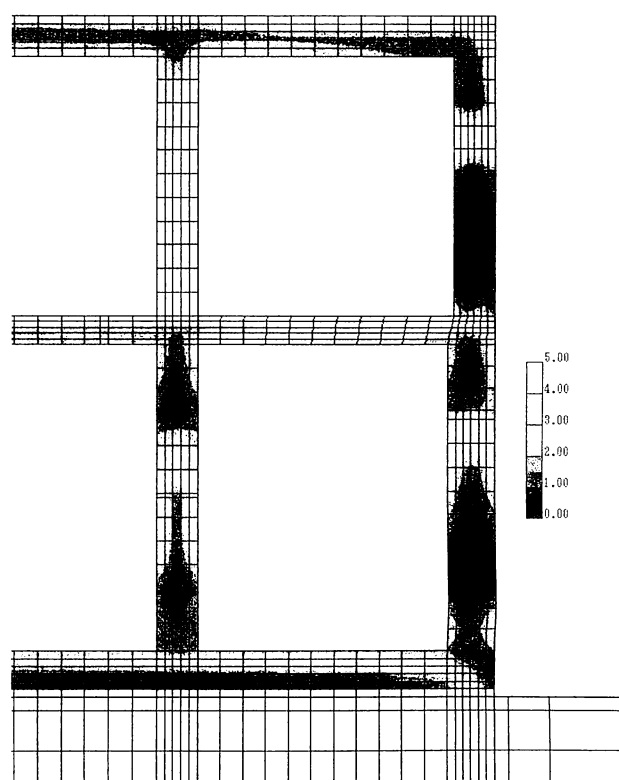


図-13 BL9 中央断面における最小ひび割れ指数分布図(乾燥考慮あり)

表-8 各打設箇所での最小ひび割れ指数 (乾燥収縮を考慮する場合)

| BL | No | 打設箇所                | 最小ひび割れ指数 | 経過日数<br>日 | BL | No  | 打設箇所                | 最小ひび割れ指数 | 経過日数<br>日 |
|----|----|---------------------|----------|-----------|----|-----|---------------------|----------|-----------|
| 10 | 1  | 下床版                 | 0.96     | 453.0     | 9  | 1   | 下床版                 | 0.89     | 453.0     |
|    | 2  | B2側壁ハンチ・<br>B2中壁ハンチ | 1.28     | 69.6      |    | 2   | B2側壁ハンチ・<br>B2中壁ハンチ | 1.51     | 90.0      |
|    | 3  | B2中壁                | 0.73     | 160.8     |    | 3   | B2中壁                | 0.89     | 188.8     |
|    | 4  | B2側壁                | 0.73     | 642.0     |    | 4-1 | B2側壁(B線)            | 0.75     | 188.8     |
|    | 5  | 中床版                 | 0.92     | 168.9     |    | 4-2 | B2側壁(A線)            | 0.74     | 605.0     |
|    | 6  | B1側壁・B1中柱           | 0.68     | 231.1     |    | 5   | 中床版                 | 1.09     | 642.0     |
|    | 7  | 上床版・B1側壁            | 0.74     | 642.0     |    | 6   | B1側壁・B1中柱           | 0.83     | 278.1     |
|    |    |                     |          |           |    | 7   | 上床版・B1側壁            | 1.25     | 477.0     |

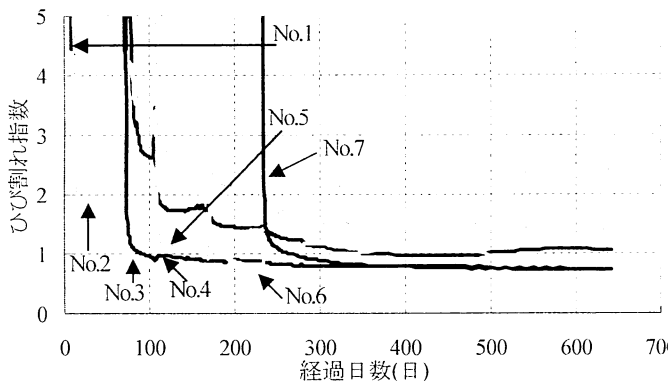


図-14 BL10ひび割れ指数の経時変化(乾燥収縮を考慮する場合)

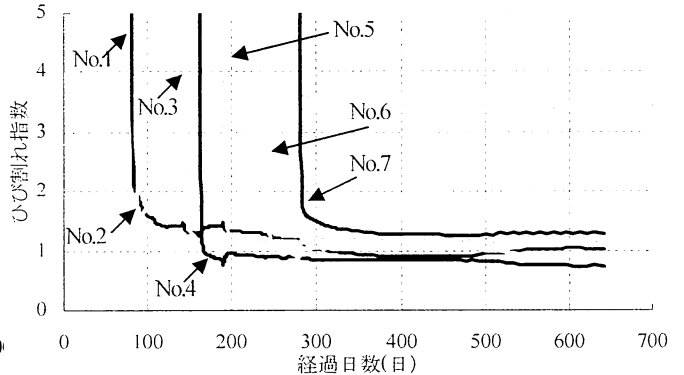


図-15 BL9 ひび割れ指数の経時変化(乾燥収縮を考慮する場合)

布図を図-13に示す。

また、図-12および図-13の断面における、各打設箇所の最小ひび割れ指数をまとめたものを表-8に示す。

これらを見ると、BL10のB2ハンチ、BL9のB2ハンチ、中床版、上床版以外で最小ひび割れ指数が1.0を下回っており、非常にひび割れが発生しやすい結果となっている。

BL10におけるひび割れ指数の経時変化を図-14に、

BL9における温度の経時変化を図-15に示す。乾燥収縮を考慮しない場合は一時的にひび割れ指数が低くなり、その後は増加する傾向が見られたが、これらのグラフを見ると、乾燥収縮を考慮した場合は打設直後からひび割れ指数が低下し続けていることがわかる。

図-16に、BL9のB1側壁における主応力図を示す。これを見ると、トンネル長手方向の応力が卓越していることが確認できる。ひび割れは主応力と直角に入るので、こ

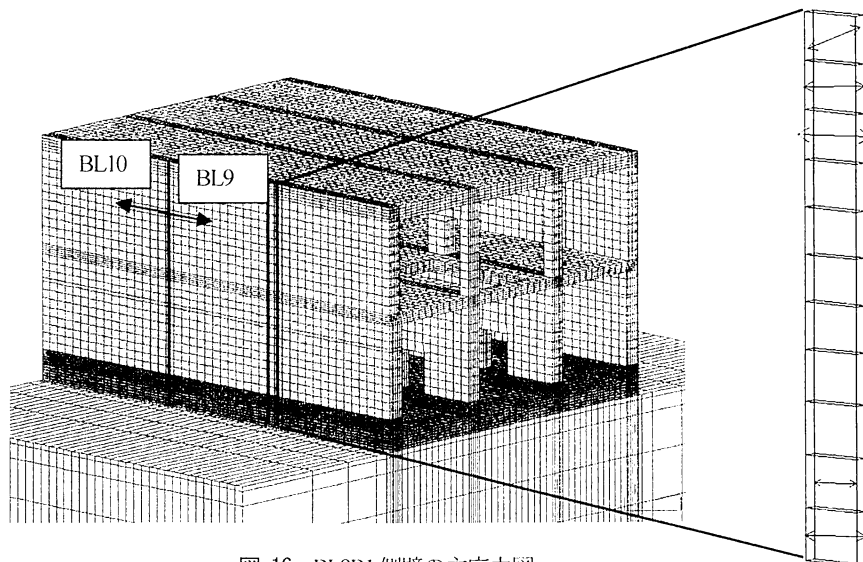


図-16 BL9B1側壁の主応力図

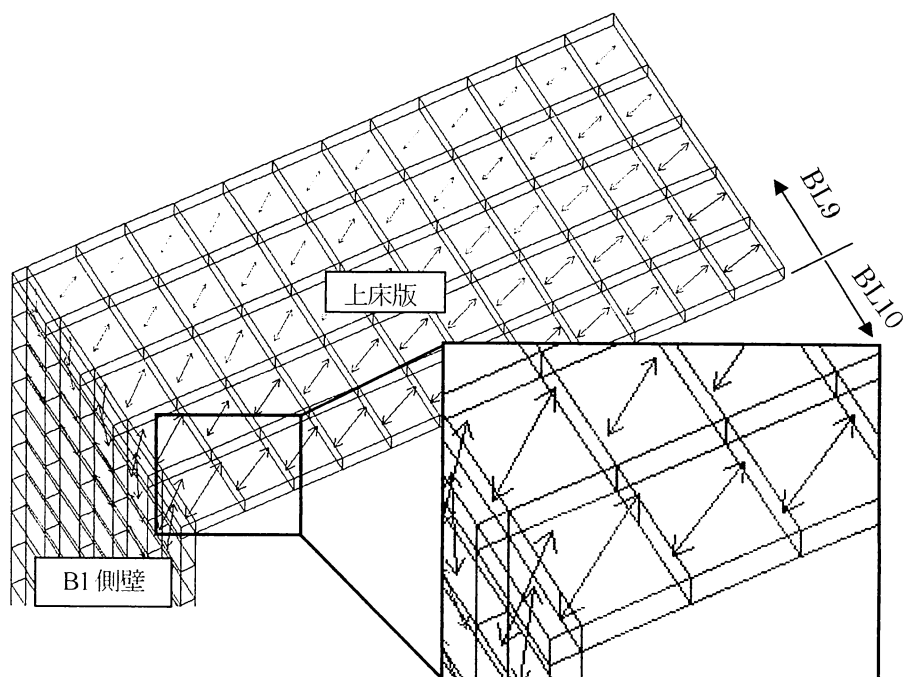


図-17 BL9ブロック打継目付近の上床版主応力図

の部分でのひび割れは、側壁に鉛直方向に入ると予想される。

打設ブロック打継目に接したBL9の上床版およびB1側壁を、トンネル内部から見た主応力ベクトル図を図-17に示す。この図を見ると、側壁と、BL10との打継目に近い部分の上床版で斜め方向の引張主応力が生じていることがわかる。これは、直下の側壁による拘束と、BL10の上床版からの拘束を受けるためと考えられる。このことから、この部分でのひび割れは打継目から側壁方向に斜めに入るものと予想される。

#### (4) 目視調査結果と解析結果との比較

目視調査によるコンクリート打設12ヶ月程度経過した時点のひび割れ変状展開図の一部を図-18<sup>7)</sup>に示す。図中に①で示したひび割れは温度応力や乾燥収縮が原因と考えられるもの、②で示したひび割れは誘発目地に発生したもの、③で示したひび割れは打設ブロック境界に発生したもの、④で示したひび割れは中間杭切断箇所が原因と考えられるもの、⑤で示したひび割れは打設ブロック境界から側壁に向かって斜めに発生したものである。

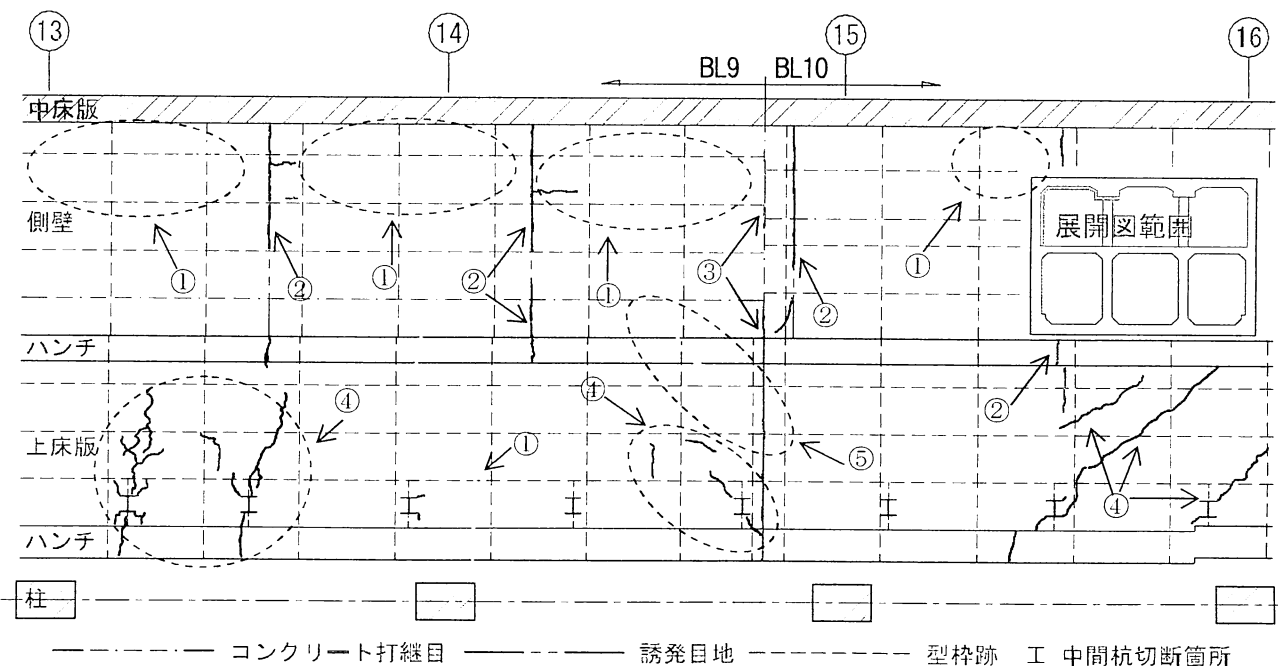


図-18 ひび割れ変状展開図<sup>7)</sup>



目視調査では、BL10の側壁にはひび割れの本数が少なく幅もヘアークラック程度のものが生じている程度であることが確認された。また上床版には中間杭による開口部の影響で生じた④のひび割れしか発生していない。これに対して、上床版については、乾燥収縮を考慮しない場合ではひび割れが発生しない解析結果となったが、乾燥収縮を考慮した場合では、ひび割れが発生する解析結果となった。側壁についても両解析ケースで評価が異なり、実際のひび割れ発生状況は、両者の中間の最小ひび割れ指数と一致する状況であった。

BL9のB1側壁は規則的に中床版側から微細なひび割れが生じている。これは、乾燥収縮を考慮した場合の最小ひび割れ指数0.8によって推測されるひび割れ発生状況に近い。

BL9の上床版には中間杭による開口部の影響で生じた④のひび割れと、コンクリート打継目から斜めに伸びている⑤で示したひび割れが発生していた。このひび割れは、図-17で示した主応力図より、解析で実際の状況を再現出来たといえる。

上床版についての解析では、BL10とは異なった解析結果となり、乾燥収縮を考慮しない場合と乾燥収縮を考慮した場合の両ケースで、ほとんどひび割れが発生しない結果となり、実際の状況を表現できている。

BL9のコンクリート打継目部の解析結果は、乾燥収縮を考慮した場合の最小ひび割れ指数0.6で、乾燥収縮を考慮しない場合の最小ひび割れ指数1.2であった。この場合は、乾燥収縮を考慮したケースの解析結果が現実のひび割れ発生状況にやや近いと判断される。

以上をまとめると、今回の解析では、乾燥収縮を考慮しない解析において、ほとんどの箇所ではひび割れが発生しない結果となった。一方、乾燥収縮を考慮した解析では、実際のひび割れ発生状況よりもひび割れが発生する結果となった箇所もあったが、おおむね実際のひび割れ状況を再現できている箇所もあった。通常、温度応力ひび割れを考慮する必要があるのは側壁が500mm以上の場合であるが、温度応力が主要なひび割れの要因となるのは側壁厚が1mを超えたときである。また、乾燥収縮は部材厚1mを下回る場合に考慮する必要がある。これらのことから、今回の解析結果では乾燥収縮を考慮した解析の方が実際のひび割れ状況に近い結果が得られたと考えられる。

## 5. 結論

今回の検討で得られた知見を以下にまとめる。

- ・側壁の厚さが 700～800mm 程度の外部拘束を受ける壁構造では、乾燥収縮を考慮しない温度応力解析しか行

われないことが多い。しかし、今回のようなケースでは、乾燥収縮を考慮しない解析ではほとんどひび割れが発生しない解析結果となり、実際のひび割れ発生状況と差異が生じた。一方、乾燥収縮を考慮した解析では、BL9 においては実際のひび割れ発生状況を再現できた。このことから、乾燥収縮を考慮しない場合よりも、乾燥収縮を考慮した場合の方が、実際のひび割れ発生状況を再現することができる可能性が高い。しかし、現状の乾燥収縮ひずみ量の推定式はやや過大な評価をしているため、乾燥収縮を考慮した場合の解析はひび割れが多く発生する結果となる傾向がある。今回のように乾燥収縮を考慮した場合の結果でひび割れ対策を行うとすると、対策コストが非常に高くなってしまいう可能性が高い。

- ・開削トンネルの場合は、後から打設するブロックの床版の打継目部にトンネル方向のひび割れが発生する可能性が高いので、設計や施工検討の際に注意が必要である。
- ・乾燥収縮ひずみが大きい温度応力解析では、ひび割れ指数の結果が安定し、その評価を的確に判断することが比較的容易である。温度応力が卓越する温度応力解析、特に複雑かつ大規模な開削トンネルにおける解析では、ひび割れ指数が経時的に大きく変化する結果となるため、その評価は難しいものとなる。経時的に大きく変化する結果に対して、どの時点の値を採用するかは、今後の課題である。

謝辞：本論文のまとめるにあたって貴重なご意見をくださった（株）コンポート 有賀貴志氏に深甚なる謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 平井祐貴, 岩波基, 大澤拓洋：大規模開削トンネル躯体の温度応力解析結果の評価に関する一考察, トンネル工学報告集, vol18, pp.295-300, 2008.
- 2) 石田高啓, 田嶋仁志, 前田邦彦：開削トンネルのマスコン対策検討, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.12, pp.571-576, 2002.
- 3) 小松郁夫, 佐藤奈津代：開削トンネルの躯体コンクリート打設に関する検討と実績, 阪神高速道路公団技術研究発表会論文集, Vol.32, pp.138-143, 1999.
- 4) 奥原祐治：開削トンネルのひび割れ対策, 土木技術, Vol.56, pp.91-97, 2001.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書・施工編, 2002.
- 6) 岩波基, 江島裕章, 竹内秀二, 榎原賢二：大深度円形立坑における温度応力対策に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol20, pp1255-1260, 1998.
- 7) 諸橋由治, 石川幸宏, 瀬筒新弥, 新井泰, 有賀貴志：開削トンネルの材料ひび割れに関する一考察, トンネル工学報告集, vol.17, pp.349-354, 2007.11

# STUDY ON COMPARING TEMPERATURE STRESS ANALYSIS RESULTS WITH A CRACK CONFIRMATION OF MASSIVE CUT AND COVER TUNNEL

Yuuki HIRAI, Keiji OISHI and Motoi IWANAMI

Shinjuku-sanchōme Station is a metro station in Shinjuku 3-chōme, Shinjuku, Tokyo. This massive complicate tunnel was built with open cut method. All the while, there are several studies that compared temperature stress analysis results with a crack confirmation by watching on small simple box culvert structure. But there is no study on massive complicate box culvert structure like this tunnel.

We compared a crack confirmation by watching circumstantially with three dimensional analyses results and weighed the differences.