

統計的分析による覆工コンクリートのひび割れ幅予測に関する検討

清水建設(株) 正会員 ○ 幸田 圭司, 山口 浩
正会員 根本 浩史, 平野 宏幸

1. はじめに

山岳トンネルの二次覆工は無筋コンクリートで構築され、施工的・材料的要因によるひび割れの発生が問題となることがある。中でも、主に材料的要因によって発生するひび割れとして、覆工下端から SL 付近にかけて発生するひび割れが挙げられ、これはコンクリートに発生する乾燥収縮および温度応力が、インバートおよび地山に拘束されることによって発生するものである。しかし、乾燥収縮および温度応力の両方を考慮した無筋コンクリートのひび割れ幅の予測手法は確立されていない。そこで本検討では、覆工コンクリートのひび割れ対策選定方法を確立することを目的とし、過去に施工されたトンネルのひび割れ調査結果を基に、乾燥収縮・温度応力とひび割れ幅の関係について回帰分析を行い、覆工コンクリートのひび割れ幅の予測式を構築することを試みた。本稿は、その検討方法および検討結果をまとめ、報告するものである。

2. ひび割れ幅の予測式について

覆工コンクリートに発生するひび割れの発生原因は多岐にわたり、施工に起因するものも多く挙げられるが、本検討では、主に材料的要因に起因すると考えられる覆工下端から SL 付近にかけてのひび割れに着目し、下記の式(1)によって、発生するひび割れの幅を評価することを試みた。

$$w = \alpha x + \beta y \cdots \text{式(1)}$$

ここで、 w ：ひび割れ幅 (mm)、

α ：乾燥収縮ひずみの影響度、 x ：乾燥収縮ひずみ (μ)

β ：温度引張応力の影響度、 y ：温度引張応力 (N/mm^2)

乾燥収縮ひずみおよび温度引張応力の影響度 (α および β) については、過去に施工されたトンネル 6 例のひび割れ調査結果を基に、回帰分析を行うことでそれぞれ算出することとした。回帰分析に用いる乾燥収縮ひずみ、温度引張応力およびひび割れ幅それぞれの評価方法を下記にまとめる。

(1) 乾燥収縮ひずみ x の評価について

乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129 に準拠した長さ変化試験および、任意の材齢における乾燥収縮ひずみが評価可能な下記の式(2)¹⁾によって評価した。

$$\varepsilon'_{sh}(t, t_0) = \left\{ (1 - RH / 100) / (1 - 60 / 100) \varepsilon'_{sh,inf}(t - t_0) \right\} / \left\{ (d / 100)^2 \beta + (t - t_0) \right\} \cdots \text{式(2)}$$

ここで、 $\varepsilon'_{sh}(t, t_0)$ ：部材の収縮ひずみ、 t, t_0 ：コンクリートの材齢および乾燥開始材齢 (日)

RH ：構造物の置かれる環境の平均相対湿度 (%), d ：有効部材厚 (mm)

$\varepsilon'_{sh,inf}$ ：乾燥収縮ひずみの最終値、 β ：乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数

本検討では、覆工コンクリート構築からひび割れ点検時までの期間を乾燥期間として、ひび割れ点検時に想定される乾燥収縮ひずみを算出した。なお、乾燥収縮は部材表面における乾燥の影響が大きいことから、有効部材厚 d は、長さ変化試験における有効断面 ($d = 100$) を用いることとした。

(2) 温度引張応力 y の評価について

温度引張応力は、2012 年制定のコンクリート標準示方書【設計編】に準拠した 3 次元温度応力解析を実施することで評価した。なお、図-1 に温度引張応力の算出例を示すが、本検討では、ひび割れ指数が最小となる時点での引張応力と引張強度の差分を温度引張応力として用いることとした。

キーワード トンネル、覆工コンクリート、ひび割れ、乾燥収縮、温度応力、回帰分析

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設(株) 土木技術本部 基盤技術部 TEL：03-3561-3915

表-1 分析対象トンネル

分析対象	使用セメント	覆工厚さ(cm)	インバートの有無	備考
A トンネル	普通ポルトランドセメント	30	有り	—
B トンネル	高炉セメント B 種	40	有り, 無し	収縮低減剤使用
C トンネル	高炉セメント B 種	30	有り, 無し	膨張材使用
D トンネル	高炉セメント B 種	30	有り	—
E トンネル	普通ポルトランドセメント	30	有り	フライッシュ混和
F トンネル	普通ポルトランドセメント	30	有り	—

(3) ひび割れ幅 w の評価について

過去に施工されたトンネルのひび割れ調査結果を基に、下記の式(3)の通り、施工ブロックごとの最大ひび割れ幅の平均値を用いた。

$$w = \frac{\sum w_n}{n} \dots \text{式(3)}$$

ここで、 w_n : n ブロックの最大ひび割れ幅 (mm)

なお、発生しているひび割れの幅は施工時期によって異なる(夏場施工のひび割れ幅が大きい)傾向にあるため、施工月ごとでそれぞれ算出することとした。

3. 回帰分析結果

過去に施工されたトンネル 6 例の諸元を表-1 に、ひび割れ幅の予測値と実測値の関係を図-2 にそれぞれまとめる。なお、全てのトンネルにおいて、湿潤養生期間は打込みから脱型までの 1 日間程度である。回帰分析の結果、乾燥収縮ひずみの影響度 $\alpha = 0.000649$ 、温度引張応力の影響度 $\beta = 0.111$ と算出され、予測値と実測値は強い相関を有する(相関係数 $R = 0.88$) ことが確認できた。この回帰分析結果から、コンクリートの収縮に起因する、覆工下端から SL 付近にかけてのひび割れの幅は、乾燥収縮ひずみおよび温度応力によって推定可能であることがわかった。

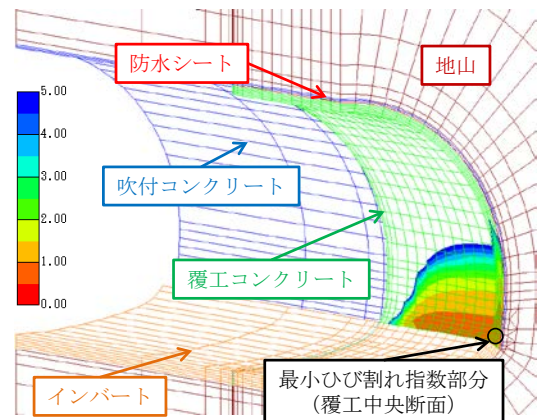
4. まとめ

トンネル 6 例のひび割れ調査結果を基に、回帰分析による覆工コンクリートのひび割れ幅の予測式の構築を試みた。覆工コンクリートに発生するひび割れのうち、コンクリートの収縮に起因する、覆工下端から SL 付近にかけてのひび割れの幅については、乾燥収縮ひずみおよび温度引張応力によって推定可能であり、これによって覆工コンクリートのひび割れ対策の選定が可能になると言える。今後は養生の影響等も考慮した、より精度の高い予測式の構築が必要である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，pp105-107，2012

◆ 最小ひび割れ指数分布図



◆ 温度引張応力計算例

- ・ 最小ひび割れ指数：0.65
- ・ ひび割れ指数が最小となる材齢：184日
- ・ 材齢184日における発生応力：5.30 N/mm²
- ・ 材齢184日における引張強度：3.42 N/mm²
- ・ ひび割れ発生に寄与する温度引張応力 y
 $y = 5.30 - 3.42 = \underline{1.88 \text{ N/mm}^2}$

図-1 温度引張応力の算出例

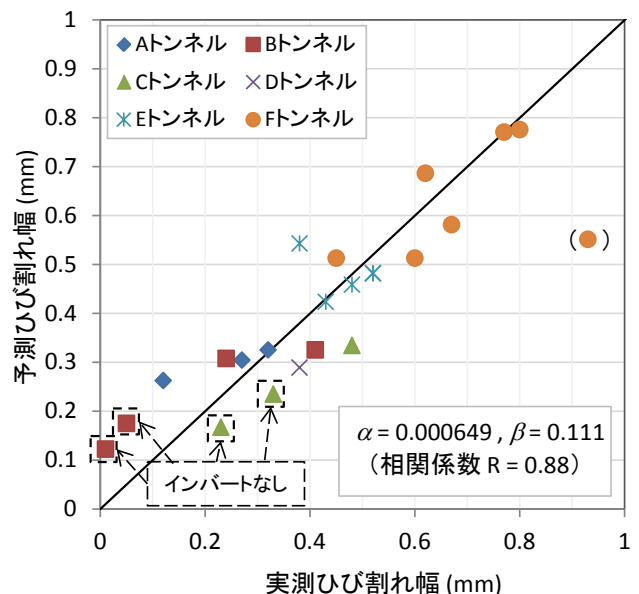


図-2 ひび割れ幅の予測値と実測値の関係