

クリープを考慮した覆工コンクリートの温度および乾燥収縮応力解析

北海道大学大学院工学研究科 学生会員 川田雅紀
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 大沼博志
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 出雲健司

1. はじめに

ひび割れ発生原因の解明を目的として、地中線シールドトンネル二次覆工コンクリートのひび割れ解析を行った。ひび割れ発生原因の定性的な原因としては、セメントの水和熱に起因する、あるいはトンネル内の外気温の低下に伴って生じるコンクリートの温度収縮および経時的な乾燥に伴って生じる乾燥収縮が考えられる。これらの収縮変形がセグメント等による外部拘束あるいは内部拘束によって、コンクリートには引張応力が発生し、それが引張強度を越えるときひび割れが生じる。このひび割れ解析では、定量的にひび割れ発生原因を評価するとともに、現地計測との比較からクリープを考慮した解析方法の妥当性を検証した。解析の対象とする構造物は、現地計測の実験結果が得られている内径2.5m、コンクリートの覆工厚さが鋼セグメントのスキンプレート(厚さ6.4mm)部で32.5cm、主桁部で17.5cmの地中線シールドトンネルである。

2. 解析方法

有限要素法による軸対称応力解析法、非定常熱伝導解析法、非定常水分拡散解析法およびクリープ解析法を用いた。クリープ解析ではコンクリートのクリープは応力に比例するという線形クリープ理論が成立すると仮定し、単位クリープ理論の考え方を取り入れて、温度関数を適当に選ぶとき、異なった温度に対する一群のクリープ曲線は一本の単位クリープ曲線 ε_{sic} で表示できると仮定する。そうして、与えられた応力と温度に対するクリープ速度を、次式のよう、温度関数 $\phi(T)$ 、応力 σ および単位クリープ速度の積で定義する。

$$\frac{d\varepsilon_{creep}}{dt} = \phi(t) * \sigma * \frac{d\varepsilon_{sic}}{dt} \quad (1)$$

応力と温度が変化する場合のクリープ解析には、重ね合わせ法を適用した。これは、応力変化や温度変化が生じる毎にクリープが別個に発生するものとし、これらのクリープの累積値によって全クリープひずみを求める方法であって、クリープに及ぼす応力履歴、温度履歴および応力作用時のコンクリート材齢の影響を考慮することができる。

3. 解析モデル

図-1に示すように、三角形断面リング要素を用いて鋼セグメント1個分をモデル化した。また、トンネル長手方向は完全拘束とした。土の要素は温度分布の計算のみに用い、またトンネル内表面は熱伝達境界条件とし、熱伝達率は $20.93\text{kJ/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ の値を与えた。

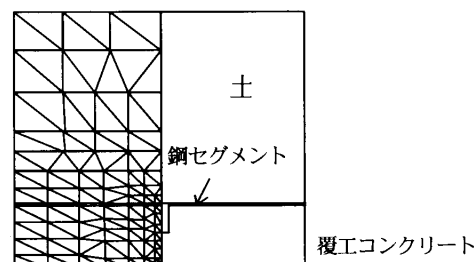


図-1 解析に用いた要素分割

4. ひび割れの発生条件

ひび割れ発生判定には、次の条件を用いた。

$$\sigma \geq \sigma_t \quad (2)$$

ここで、 σ_t : コンクリートの引張強度

5. 解析に使用した材料特性

5.1 コンクリートの配合および材料特性

二次覆工のコンクリートには、水和熱抑制型膨張材を用いた収縮補償コンクリートを選定した。膨張コンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法20mm、スランプ $17 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $5.5 \pm 1\%$ 、水セメント比62%、および細骨材率46.5%であり、水和熱抑制型膨張材を単位体積当たり30kg混合した。

材齢28日における膨張コンクリートの圧縮強度、曲げ強度、引張強度およびヤング係数はそれぞれ25.3、4.77、2.26および $2.97 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ であった。応力解析では、材齢変化を考慮したヤング係数を、またひび割れ発生判定には同様の引張強度を用いた。ポアソン比は0.167とした。温度解析に使用した膨張コンクリートの熱的性質は、熱伝導率 $9.054 \text{kJ/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 、熱拡散率 $3.26 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{hr}$ 、比熱 $1.180 \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 、および線膨張率 $10.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ である。

キーワード 温度応力、乾燥収縮応力、クリープ

連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目 極限環境材料学分野 TEL 011-706-7276

5.2 コンクリートの乾燥収縮

乾燥収縮に関する応力解析では、乾燥収縮試験結果を基に一定値の乾燥収縮係数 $2.708 \times 10^{-3}/\text{g}/\text{cm}^3$ を用いた。

5.3 コンクリートのクリープ特性

圧縮クリープ試験によって温度 20°C のコンクリートの単位クリープ曲線式を求めた。この圧縮クリープ試験では、載荷応力が圧縮強度の 40% 以下であるので、クリープは載荷応力に比例するという線形クリープ理論が成立する範囲にある。そこで、クリープ曲線式は単位応力度当たりのひずみ（単位クリープ）で表示することにした。ここでは、実験結果を最もよく近似した次の双曲線による修正対数式を用いることにした。

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_i} + \frac{\alpha \beta t}{1 + \alpha t} + F(k, T) \cdot \ln(t + 1) \quad (10^{-6} / \text{N} / \text{mm}^2) \quad (3)$$

ここで、 E_i はヤング係数、 k は載荷時のコンクリート材齢（日）、 T はコンクリートの温度、 t は載荷後の経過時間、 α と β は実験定数である。

5.4 セグメントと土の材料定数

解析に用いたセグメントのヤング係数、ポアソン比、熱伝導率、比熱および単位体積質量はそれぞれ $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、0.3、 $18.84 \text{ kJ/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 、 $0.46 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ および 7860 kg/m^3 である。また、土の熱伝導率、比熱および単位体積質量は、 $5.233 \text{ kJ/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 、 $0.837 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 、 1250 kg/m^3 である。

6. 応力解析結果と考察

覆工コンクリートの応力解析結果を図-2に示す。この図で、乾燥収縮に伴う応力は通風後においてのみ解析した。また、この乾燥収縮応力はトンネル内表面から 5 cm の平均値とした。

(1) 膨張材の混和によってコンクリートに膨張ひずみが生じ、そのためコンクリート打設直後に 0.8 N/mm^2 の圧縮応力（ケミカルプレストレス）が発生した。この圧縮応力はコンクリートのクリープによって応力緩和現象をほとんど

示さないことが解析から明らかにされた。若材齢コンクリートはクリープ係数が小さいためであると考えられる。

(2) 実際の応力履歴を近似していると考えられる温度応力のクリープ解析では、水和熱による温度応力のみでは覆工コンクリートにひび割れが発生しないことが明らかにされた。これは、現地計測の結果とよく一致している。

(3) 通風後の温度降下は水和熱によるものよりも影響の大きいことが示された。これは、材齢の増加に伴ってヤング係数が増大するために、同一の温度変化に対する温度応力は通風後が大きく、またコンクリートのクリープによる応力緩和が小さいためである。ただし、水和熱とこの温度降下による温度応力のみによっては覆工コンクリートにひび割れが発生しないことが示された。

(4) 非定常水分拡散解析の結果から、コンクリートの乾燥収縮に伴う応力は乾燥収縮係数にほぼ比例する。また、乾燥収縮応力は覆工コンクリートの内部拘束とセグメントによる外部拘束によって極めて大きな値となることが明らかにされた。すなわち、クリープ解析においてコンクリートのクリープによる応力緩和現象を考慮に入れたとしても通風開始 2 ヶ月後には 2 N/mm^2 から 3 N/mm^2 の引張応力が生じ、ひび割れの発生を避けることはできないという解析結果となった。

(5) この覆工コンクリートの場合には、温度応力のみによってひび割れは発生せず、温度応力と乾燥収縮応力が累積したために、ひび割れが発生したと考えられる。

参考文献

- 1) 矢川元基 監修訳：マトリックス有限要素法、科学技術出版社、1996
- 2) 大沼博志、栗山武雄、河角誠：膨張コンクリートの圧縮および引張クリープ特性、セメント技術年報、第 39 巻、pp.368-371, 1985.5

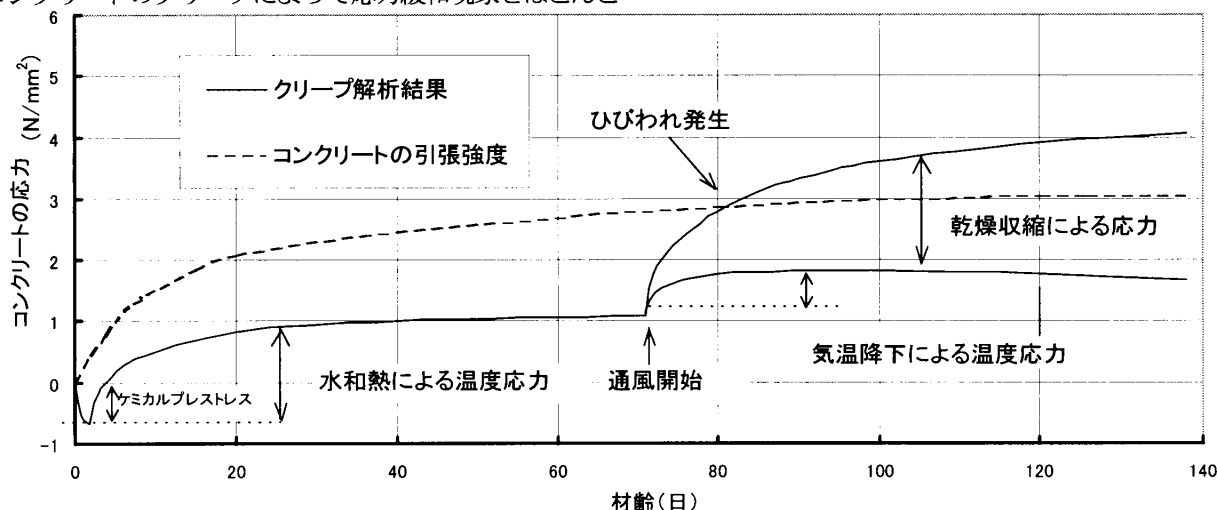


図-2 コンクリートの応力解析結果