

クリープを考慮したトンネル覆工コンクリートのひび割れ解析

Cracking analysis of a tunnel lining concrete considering the creep of concrete

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 川田 雅紀(Masaki Kawata)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 大沼 博志(Hiroshi Ohnuma)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 出雲 健司(Kenji Izumo)

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。しかし、その原因は明確にされていないとはいえず、上記の原因が複合されたものであると推定される。このひび割れ解析では、できるだけ定量的にひび割れ発生原因を評価しようと試みた。

2. トンネルの概要

地中線シールドトンネルは内径 2.5m であり、コンクリートの覆工厚さは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 である。1 スパン 10.8m として打ち継ぎ目を設け、3 スパン連続してコンクリートを打設した。このうち、中央スパンにおいて計測器を設置し、コンクリートとセグメントの温度とひずみを計測した。コンクリートの打設後、トンネルの両端を閉塞して通風を防止し、坑内湿度を 90%以上 に保持した。打設 70 日後に計測区間の通風を開始した。

3. 解析方法

3.1 軸対称応力解析

有限要素法による軸対称応力解析法を用いた¹⁾。

$$\{F\} = [K]\{\delta\} + \{F\}_p + \{F\}_{\varepsilon_0} \quad (1)$$

ここで、 $\{F\}$: 節点力、 $[K]$: 剛性マトリックス、 $\{\delta\}$:

節点変位、 $\{F\}_p = -\int [N]^T \{p\} dv$: 分布荷重 (p) と静的

に等価な節点力、 $\{F\}_{\varepsilon_0} = -\int [B]^T [D]\{\varepsilon_0\} dv$: 初期ひずみ

(ε_0) による節点力である。

3.2 非定常熱伝導解析および非定常水分拡散解析

軸対称問題の非定常熱伝導は、次の 2 次偏微分方程式で与えられる²⁾。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(r^* K_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r^* K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r^* Q - r^* \rho^* c^* \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

境界条件としては次の 2 種類がある。

(a) 固定境界条件 : $T = T_a$

(b) 熱伝達境界条件 :

$$r^* K_n \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) + r^* h^* (T - T_0) = 0$$

ここで、 r, z : 座標、 T : 温度、 K_r, K_z : r, z 方向の熱伝

導率、 t : 時間、 Q : 内部発熱率、 ρ : 密度、 c : 比熱、 T_a :

境界で指定される温度、 h : 熱伝達率、 T_0 : 熱伝達境界面

の流体温度である。

内部発熱がある場合には、発熱率は次式の断熱温度上昇曲線を微分して与える。

$$T = K_1 \left(1 - e^{-\alpha t^\beta} \right) \quad (3)$$

ここで、 K_1 、 α および β は実験定数である。

温度変化に伴う膨張および収縮ひずみは、コンクリートの線膨張係数を α_c 、温度変化を ΔT とすると、次式で与えられる。

$$\{\varepsilon_0\} = \alpha_c \{\Delta T\} \quad (4)$$

非定常水分拡散の解析法は熱伝導解析と同一形である。境界条件としては、固定境界条件と水分伝達条件の 2 種類がある³⁾。水分変化に伴う乾燥収縮ひずみは、コンクリートの乾燥収縮係数を β_c 、水分変化を Δw とすると、次式から求めることができる³⁾。

$$\{\varepsilon_0\} = \beta_c \{\Delta w\} \quad (5)$$

3.3 クリープ解析

最初に、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する。さらに、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_{stc} 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、次式のように、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²⁾。

$$\frac{d\varepsilon_{creep}}{dt} = \phi(t) * \sigma * \frac{d\varepsilon_{stc}}{dt} \quad (6)$$

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。

3.4 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セグメント1個をモデル化した。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使い、またトンネル内表面は熱伝達境界条件とし、熱伝達率は $5.0 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$ の値を与えた。

3.5 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。

$$\sigma \geq \sigma_t \quad (7)$$

ここで、 σ_t : コンクリートの引張強度

4. 解析に使用した材料特性

4.1 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 20 mm 、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 30 kg 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 $2.163 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 、熱拡散率 $3.26 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{hr}$ 、比熱 $0.282 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 、および線膨張率 $10.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ である。断熱温度上昇試験で得られた温度上昇曲線を図-2に示す。

4.2 コンクリートの乾燥収縮

乾燥収縮試験³⁾で得られた乾燥収縮ひずみと平均水分変化量との関係から乾燥収縮係数 β を算定することができる。乾燥収縮に関する応力解析では、一定値の乾燥収縮係数 $2.708 \times 10^{-3} / \text{gr/cm}^3$ を用いた。

4.3 コンクリートのクリープ特性

図-3に示すように、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⁴⁾。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。

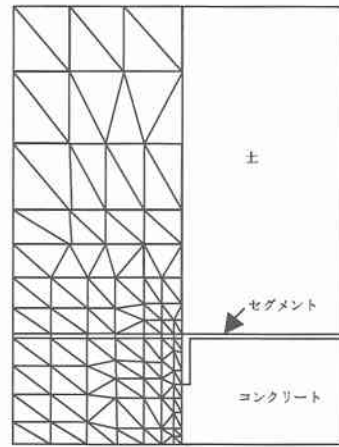


図-1 解析に用いた要素分割

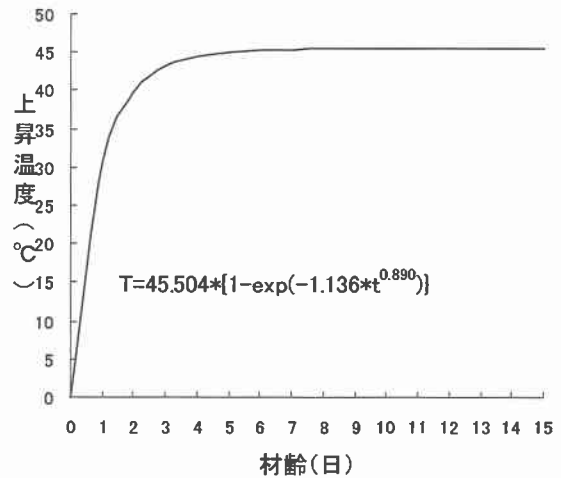


図-2 コンクリートの断熱温度上昇曲線

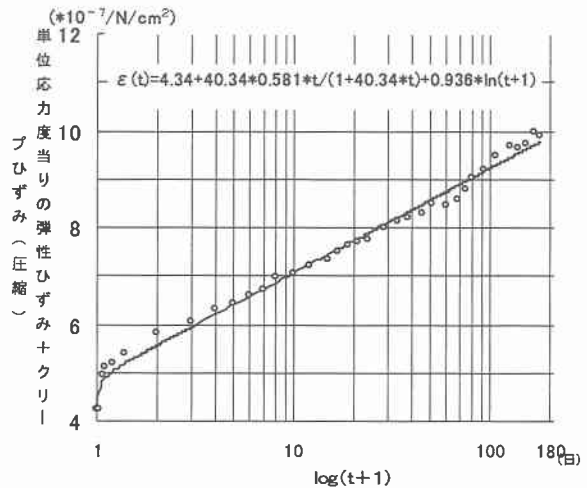


図-3 コンクリートの単位クリープ曲線

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_i} + \frac{\alpha \beta t}{1 + \alpha t} + F(k, T) \cdot \ln(t+1) \quad (10^{-6} / \text{kg} / \text{cm}^2) \quad (8)$$

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、 α と β は実験定数であ

る。

載荷材齢が古いほどコンクリートのクリープは小さいことが明らかにされている。圧縮クリープ試験の結果⁴⁾から、図-4に示すように、載荷材齢 28 日のクリープ値を基準とするコンクリートのクリープの載荷材齢依存性は CEB-FIP 国際指針式によって与えた。

材齢の古いコンクリートで温度範囲が 20℃から 80℃の場合には、コンクリートが高温にさらされるほどクリープは増加することが確認されている⁵⁾。一方、若材齢のコンクリートの場合には、温度の上昇は滲出水の粘性低下によってクリープ速度を増加させると同時に、セメントの水和反応を促進させるために、材齢効果によってクリープ速度を減少させるという二つの面を持っている。材齢 5 日から 40℃に加熱し、材齢 7 日に載荷した膨張コンクリートのクリープは 20℃とほとんど同じであった⁴⁾。そのため、このクリープ解析では、全ての温度に対して 20℃の単位クリープ曲線を用いることとした。

実構造物のクリープ解析では、クリープ曲線を 3 次元に拡張することが必要である。このため、Arutyunyan の理論に基づいてクリープ変形に対してクリープポアソン比の考え方を導入した。これは通常の弾性ひずみと応力の関係を表すマトリックス中の弾性ポアソン比をクリープポアソン比に置き変えたものである。解析には、クリープポアソン比として 0.15 の一定値を用いた⁶⁾。

4.4 膨張コンクリートの膨張特性

コンクリートの膨張に伴う応力を解析するために、現地で製作したダミー供試体を用いて膨張ひずみを測定した。コンクリートの膨張ひずみ履歴を図-5に示す。

4.5 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 2.1×10^5 N/mm²、0.3、4.5kcal/m・hr・℃、0.11kcal/kg・℃および 7860kg/m³である。また、土の熱伝導率、比熱および単位体積質量は 1.25kcal/m・hr・℃、0.20kcal/kg・℃、1250kg/m³である。

5. 解析結果および現地計測結果との比較検討

5.1 コンクリートとセグメントの温度履歴

現地計測で得られたセグメントとコンクリートの温度履歴と、覆工コンクリート周囲の土を考慮に入れた非定常熱伝導解析の結果を、図-6に示す。両者の比較から次のことが明らかにされた。

1) コンクリートの断熱温度上昇曲線を用いた水和熱の非定常熱伝導解析の結果は、現地計測の結果と概ね一致した。温度上昇時および降下時の断面内温度分布は、トンネル表面と土に接している面で温度が多少低くなるものの、断面内の温度差はあまり生じない。

2) 打設後のコンクリート温度が最高温度に達するまでの時間は、解析ではおよそ 22 時間であり、現地計測で得られたもの（およそ 19 時間）よりも解析値の方が遅い傾向にあった。

3) 通風後の温度履歴の解析では、直後にトンネル内の気温が最低温度になったと仮定した。解析結果は、全般的に低目の温度が得られている。したがって、この温度

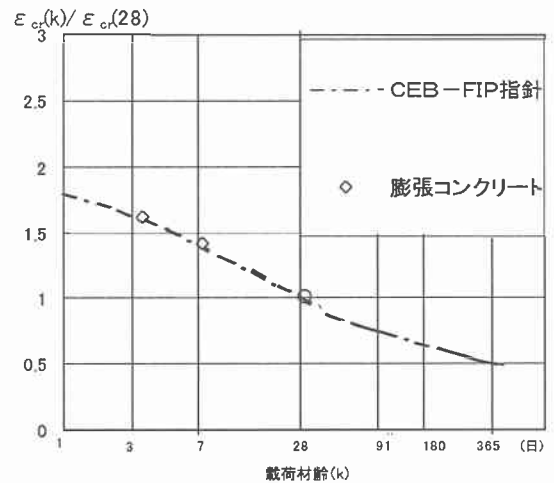


図-4 コンクリートのクリープの載荷材齢依存性

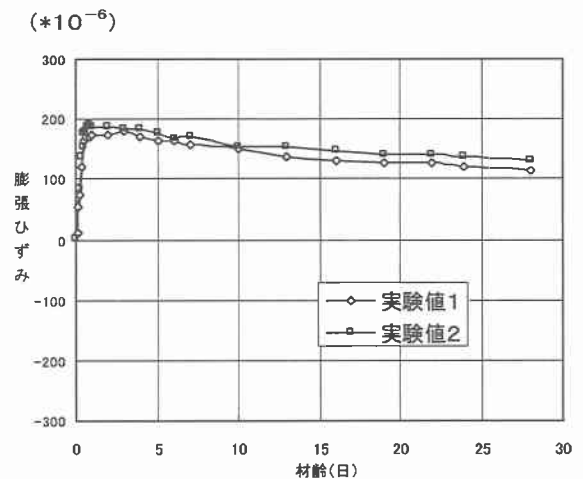


図-5 コンクリートの膨張ひずみ履歴

履歴を基にして算定した通風後の温度応力は最も厳しいものとなっている。

5.2 コンクリートの応力履歴とひび割れ発生

応力解析結果を図-7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 0.8N/mm²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。これは、若材齢コンクリートはクリープひずみと弾性ひずみの比で表わされるクリープ係数が小さいためであると考えられる。

2) 別途実施した弾性解から、水和熱による温度応力は極めて大きくなり、コンクリートの打設 7 日後にひび割れが発生するという結果が得られた。しかしながら、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から、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、現地計測の結果と全くよく一致している。

3) 通風後の温度降下は水和熱によるものよりも影響が

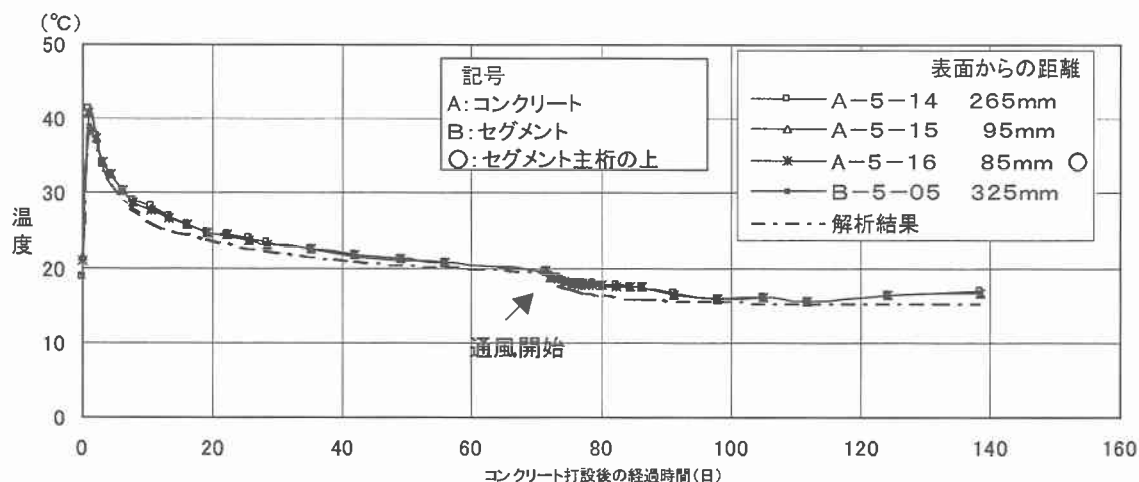


図-6 覆工コンクリートとセグメントの温度履歴

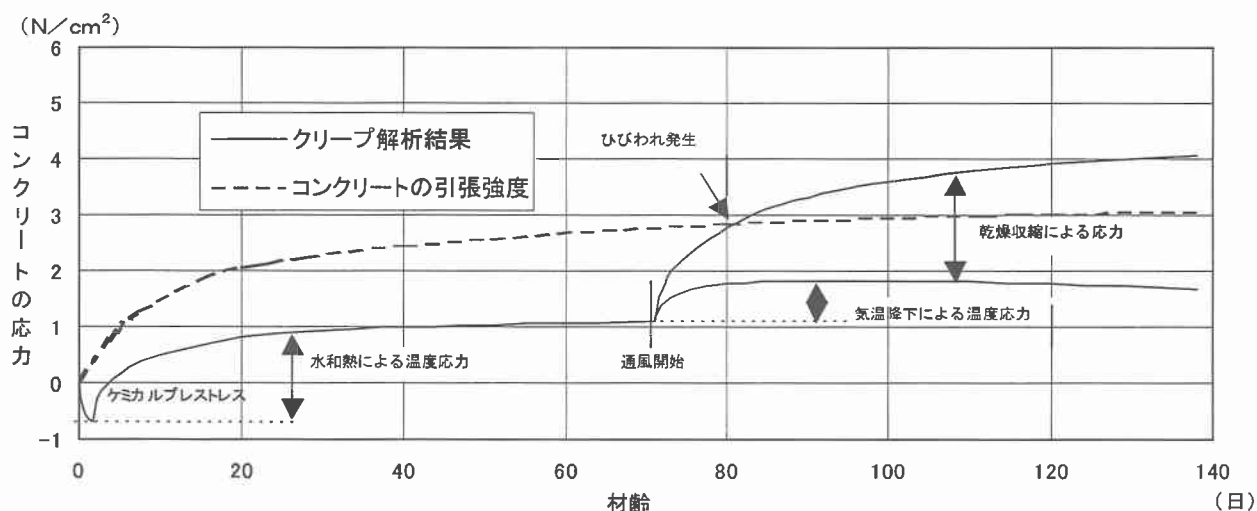


図-7 コンクリートの応力履歴の解析結果

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2N/mm²から3N/mm²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 他：プレストレストコンクリート円環体の加熱実験による高温クリープ挙動の検討、電中研研究報告 No.74016, 1975
- 3) 榊原隆志、大沼 博志、名和豊春：非定常水分拡散解析に基づくコンクリートの乾燥収縮の評価、土木学会北海道支部論文報告集、第55号(A), pp.434-437, 1999
- 4) 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
- 5) 河角誠、笠原清、栗山武雄：高温下におけるコンクリートのクリープ、電中研報告、No.72018, 1973.5
- 6) 大沼博志、名和豊春、金津努、遠藤孝夫：60℃で三軸圧縮応力を受けるコンクリートのクリープポアソン比に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.53, pp.627-634, 1999.12
- 7) 大沼博志、名和豊春、広永道彦、小澤正志：低温下におけるコンクリートのクリープ特性に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.52, pp.650-655, 1998.12