

I-46

コンクリートの発熱を考慮した熱伝導解析

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 吉村 俊彦
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 小池 明夫
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三上 隆
 (株)地崎工業技術開発部 正会員 須藤 敦史

1. はじめに

トンネル2次覆工の施工直後ないし数年以内に、コンクリートにひび割れが確認された例はいくつか報告され、その原因の1つとして、コンクリート硬化時に発生する水和熱による熱応力(温度応力)があげられる。

本研究ではひび割れ発生原因の究明の第一歩として、1次覆工と2次覆工の間に断熱材が施工される寒冷地トンネルを取り上げ、覆工コンクリートの硬化時の温度特性を非定常熱伝導解析により検討を行ったものである。

2. 解析手法

本研究に用いた、熱伝導解析における8節点アイソパラメトリック要素による有限要素法の概要とその妥当性について以下に記す。

2.1 有限要素法による熱伝導解析

熱伝導率が等方性の場合の2次元非定常熱伝導方程式は、以下となる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q$$

$T = T(x, y, t)$ 空間、時間の関数となる温度
 Q 時間の関数となる発熱率
 k 熱伝導率
 ρc 熱容量

これより、境界条件として熱伝達を考慮した、要素の非定常熱伝導問題に対する有限要素式を求めると、

$$\text{要素について } [k][T(t)] + [c] \left\{ \frac{\partial T(t)}{\partial t} \right\} = \{f(t)\} \quad \text{全体について } [K][T(t)] + [C] \left\{ \frac{\partial T(t)}{\partial t} \right\} = \{F(t)\}$$

ただし、

$$\begin{cases} [k] = \int_{s'} k \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dS + \int_s \alpha_c [N]^T [N'] dS \\ [c] = \int_{s'} \rho c [N]^T [N] dS \\ \{f(t)\} = \int_{s'} Q(t) [N]^T dS + \int_s \alpha_c T_c [N'] dS \end{cases}$$

$[k]$ 熱伝導マトリックス
 $[c]$ 熱容量マトリックス
 $\{f\}$ 熱流束ベクトル
 $[T]$ 節点温度ベクトル
 $[N]$ 内挿関数マトリックス

これを、すべての要素について重ね合わせることで全体の有限要素式が求まる。

次にクラנק・ニコルソン差分式を用いて、時間に関する離散化を行う。

$$\left(\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right) \{T(t + \Delta t)\} = \left(-\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right) \{T(t)\} + \{F(t + \Delta t)\} + \{F(t)\}$$

これにより非定常熱伝導問題の有限要素式は、 $\{T(t)\}$ が既知より、逐次解くことが出来る。¹⁾

Heat conduction analysis of concrete structures

By Toshihiko, Yoshimura Akio, Koike Takashi, Mikami Atsushi, Sudo

2. 2 解析手法の妥当性

前記の解析手法の妥当性を確認するため、簡単な1次元モデルにおいて非定常熱伝導解析を行い、その厳密解との比較を行った。

解析モデルを図1に示し、境界条件、初期条件を以下に示す。

境界条件 $x=0(\text{m})$ $T(0,t)=T_1=100(^{\circ}\text{C})$

$x=10(\text{m})$ $T(10,t)=0(^{\circ}\text{C})$

初期条件 $0<x<10(\text{m})$ $T(x,0)=0(^{\circ}\text{C})$

次に非定常熱伝導方程式による厳密解を記す。

$$T(x,t) = \left(1 - \frac{x}{l}\right) T_1 - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T_1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{l} x\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 k}{\rho c l^2} t\right)$$

時間刻みを変えた $x=1(\text{m})$ の場所における解析結果を、下の図3に示す。

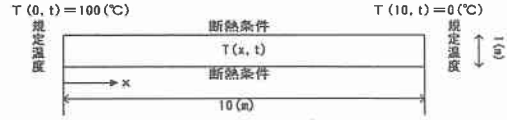
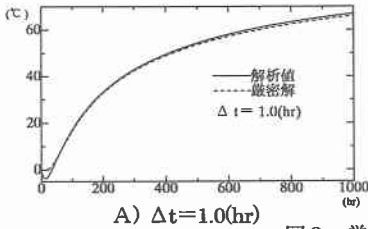


図1 1次元モデル



図2 要素分割図

熱伝導率 k	1.3(kcal/mhr $^{\circ}\text{C}$)
熱容量 ρc	500(kcal/m 3 $^{\circ}\text{C}$)

表1 物性値

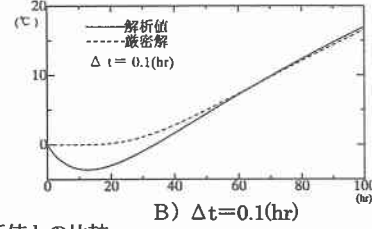


図3 厳密解と解析値との比較

初期状態に近い時間では解析値は、温度降下する傾向が見られるが、マクロ的な挙動をみると厳密解とよく一致し、この解析手法は妥当であるといえる。以下の解析の時間刻みは $\Delta t=1.0(\text{hr})$ で行う。

3. コンクリートの打ち込みモデルにおける解析

次に、実際に地盤の上にコンクリートを打ち込むことを考えたモデルを作成し、それについて解析を行った。その内容や諸条件、結果を示す。

3. 1 解析モデル

モデルと要素分割図を、右の図4、図5に示す。

境界条件として、地盤の側面を断熱とし、底面で温度規定 $5(^{\circ}\text{C})$ とする。コンクリートの側面には型枠を考える。

初期条件として、地盤では上面と底面の温度差を考慮した、1次元定常解を用いた。コンクリートでは打ち込み温度を初期温度とし $20(^{\circ}\text{C})$ とした。

解析の基本ケースとする物性値を下の表2に示す。これと対象となる物性値を変化させた場合とを比較していく。

外気温 $-5(^{\circ}\text{C})$ 、時間刻み $1.0(\text{hr})$ とした。

	熱伝導率 k (kcal/mhr $^{\circ}\text{C}$)	熱容量 ρc (kcal/m 3 $^{\circ}\text{C}$)	熱伝達率 αc (kcal/m 2 hr $^{\circ}\text{C}$)
コンクリート	2.0	550	10.0
地盤	1.0	550	
型枠			5.0

表2 解析の物性値^{2),3)}

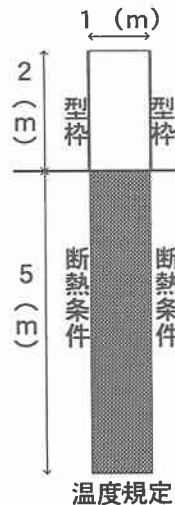


図4 モデル図

56要素 205節点

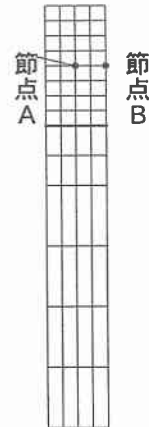


図5 要素分割図

3. 2 解析結果と考察

1) 分割数による比較

解析に用いた 56 要素 205 節点から、1 要素あたりの大きさを 4 倍にした 14 要素 61 節点のさらに粗いモデルで解析を行い、その結果を比較した。

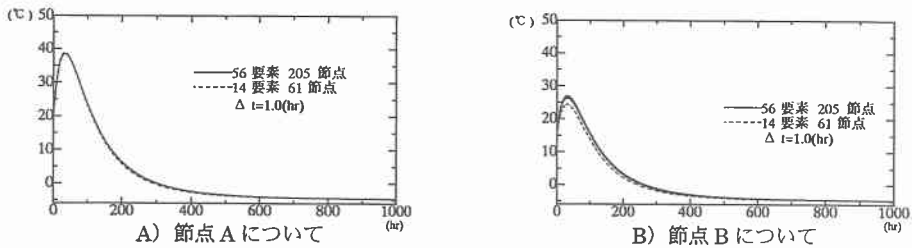


図 6 分割数の変化による影響

境界面においては、分割数の違いによる影響が顕著に表れている。境界においては温度分布の変化が急激なため粗いモデルでの解析では温度分布を近似しきれていないと考えられる。温度分布の変化が急なところでは、要素分割の方法に注意が必要である。

2) 熱伝導率による比較

コンクリートの熱伝導率が、1.0、2.0、3.0(kcal/mhr°C)の3つの場合について比較した。

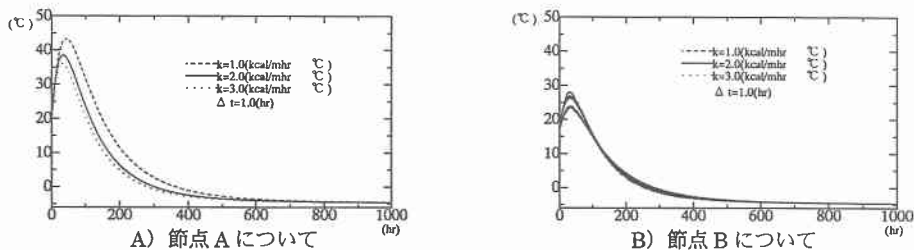


図 7 熱伝導率の変化による影響

以上のグラフより、熱伝導率が 1.0~2.0 の変化の時の方が 2.0~3.0 の時より温度は大きな影響を受ける。また、境界面では熱伝達があるためコンクリートの中の方が、温度は大きな影響を受ける。

3) 熱伝達率による比較

コンクリート、型枠の熱伝達率の組み合わせを、10.0 と 5.0、5.0 と 2.5、 ∞ と ∞ (kcal/m²hr°C)の3つの場合について比較した。熱伝達率が ∞ というのは、境界面が常に外気温と同じであることを意味している。

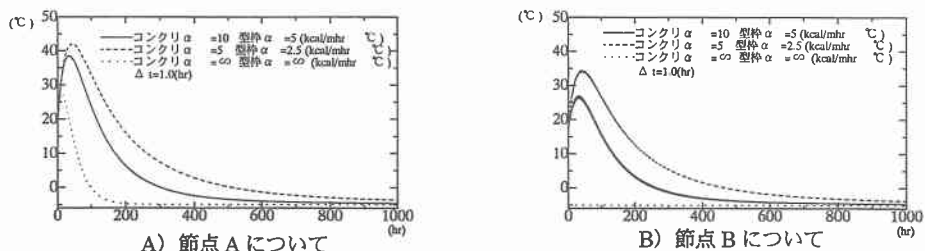


図 8 熱伝達率の変化による影響

以上のグラフより、熱伝達率が 5.0~10.0 の変化の時のは、温度は大きな影響を受ける。熱伝達率が 100(kcal/m²hr°C)の場合について、これほど大きな変化ではないことを確認している。また、境界面でも、コンクリートの中でも熱伝達率の変化については、それほど変わりはない。

4. 断熱材を考慮した熱伝導解析

4. 1 解析モデル

十分に時間のたった前解析モデルのコンクリートの上に新たにコンクリートを打設する場合を考える。新旧コンクリートの間の断熱材の有無について解析を行い比較した。

モデル図と要素分割図を右の図9、図10に示す。

旧コンクリートの初期温度は外気温とし新コンクリートの側面に型枠を考え、初期温度は打ち込み温度とした。

物性値や地盤については、前解析と同様である。

断熱材については6節点の特殊要素⁴⁾として考え、熱伝導率を $0.02(\text{kcal/mhr}^\circ\text{C})$ 、厚さ $0.01(\text{m})$ とした。

4. 2 解析結果と考察

断熱材が有る場合と無い場合について、それぞれ新旧コンクリートの中心である節点Aと節点Cにおいて比較した。

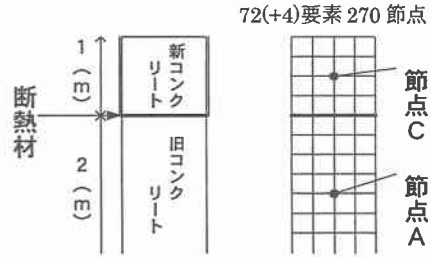
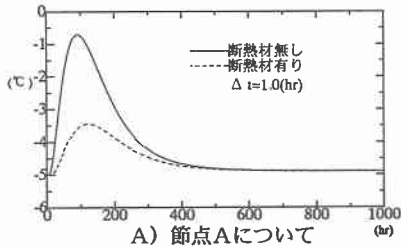
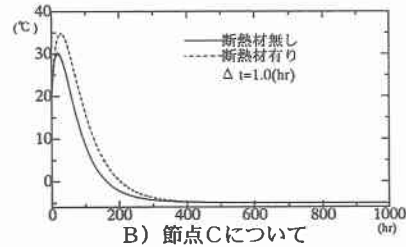


図9 モデル図

図10 要素分割

図11 断熱材の有無について



旧コンクリートでは断熱材を考慮した場合、新コンクリートの発熱による温度上昇の影響をかなり押さえられることが解る。また新コンクリートでは、熱の逃げ場が無くなることにより温度の上昇量が大きくなることも解る。これにより断熱材の効果を確認することが出来た。

5. まとめ

今回の熱伝導解析により、コンクリートの発熱による温度伝導について基礎的な特性を把握できた。また、この解析手法の妥当性が確認され、時間刻みや要素の分割という解析時における注意点も明らかとなった。

ただ解析値が、極めて初期の時間で温度が降下するという現象が認められた。これについては数値解析における誤差などが考えられ、今後更に検討する必要があると思われる。

6節点特殊要素を用い断熱材を考慮した場合の解析においては、その妥当性、有効性が確認できた。

以上のことを踏まえ、今後の課題としては、トンネル形状のモデル化をした熱応力解析を行い、発熱によるひび割れの発生について検討を行うところへと、発展させていきたい。

【参考文献】

- 1) 矢川元基、宮崎則幸：有限要素法による熱応力、クリープ熱伝導解析、サイエンス社 1985年4月
- 2) 社団法人 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力メカニズムに関するコロキウム論文集 昭和57年9月
- 3) 社団法人 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力メカニズムに関するコロキウム論文集 昭和59年3月
- 4) 吉田紀之：多層体熱伝導解析のための特殊要素の開発に関する研究 修士論文 昭和63年2月