

千代田化工建設(株) 正員 三頼達朗

1. まえがき 直射日光・火災等の輻射熱を受ける構造物は変形を拘束されて多大の熱応力が発生する可能性がある。この熱応力を算定する前に構造物の非定常熱伝導解析を行なう必要がある。輻射熱を考慮した非定常熱伝導解析はStefan-Boltzmannの法則に基づいて温度の4乗に依存する非線形問題となる。一般にはこの解析を行うのに空間領域で準線形化して収束計算を行なう。ここでは輻射熱を受ける構造物の非定常熱伝導解析を第3境界値問題を含んだ混合型境界値問題として扱う。本研究では空間領域でFEM、時間領域でexp関数にPadé関数を利用した近似法を用いて定式化しているのだからパラメータをかえることによって各種差分法・重みつき残差法に相当する方法で解析できる¹⁾。一階の常微分方程式の固有値は負の実軸上にあり、負の実軸近傍で精度の良い重みつき残差法を用いたZienkiewiczの方法²⁾を用いる³⁾。直射日光を受ける掘込式地下タンクを対象として基礎実験と数値計算を行ない、両者を比較した。

2. 基礎方程式 非定常熱伝導解析の基礎微分方程式は式(1)で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(h_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + F - C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ただし、 x_i : 空間座標、 h_{ij} : 温度剛性、 T : 温度、 F : 熱荷重(内部発熱等)、 C_p : 定圧比熱、 ρ : 単位体積重量、 t : 時間

境界値問題として次のものが一般に考えられる⁴⁾。

(1) 第1境界値問題(境界 S_1 で温度が規定される。)

$$T = T_p \quad \text{on } S_1 \quad (2)$$

(2) 第2境界値問題(境界 S_2 で熱流束が規定される。)

$$h_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} n_i = -Q \quad \text{on } S_2 \quad (3)$$

ただし、 n_i : 境界 S_2 における外向き法線ベクトルの成分、 Q : 境界 S_2 上で単位面積あたりの流入熱流束

(3) 第3境界値問題(境界 S_3 で熱流束と熱伝達率が規定される。)

$$h_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} n_i = -Q - \alpha(T - T_s) \quad \text{on } S_3 \quad (4)$$

ただし、 α : 熱伝達率、 T_s : 周囲気温度
輻射エネルギー流束は温度の4乗に依存する空間領域での非線形項となる。輻射熱を熱流束とみなして時間に依存する入力条件として区分線形化法を用いて設定した。周囲気温度と熱伝達率を介して考慮できる第3境界値問題として扱う。一般的には各種境界値問題の混合した混合境界値問題となる。

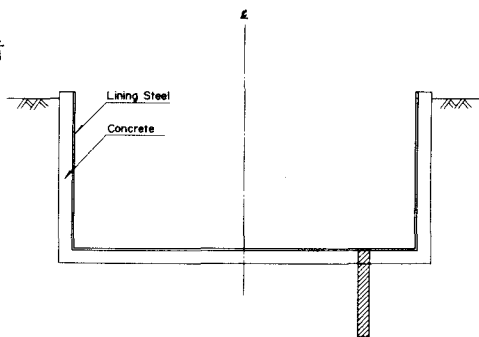


Fig. 1 Excavated Underground Tank

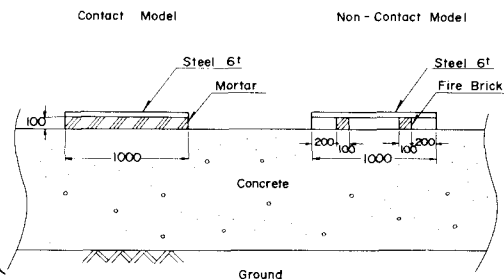


Fig. 2 Experimental Model

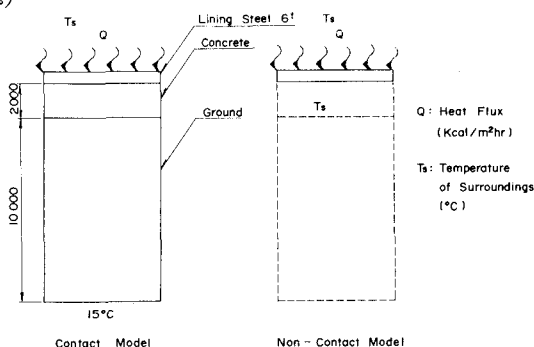


Fig. 3 Finite Element Model

3. 基礎実験と数値計算の比較

掘込式地下タンクの側壁部・底版部は内張鋼板とコンクリート躯体から成っている。施工時に掘込式地下タンクに直射日光が作用するとその輻射熱により内張鋼板・コンクリート躯体に熱応力が発生する。内張鋼板・コンクリート躯体を設計する際、温度荷重の設定が重要となる。そこで基礎資料を得る為に直射日光の輻射熱に対する基礎実験および、数値実験モデルの非定常熱伝導解析を行った。

3.1 実験モデルと数値実験モデル

解析の対象として掘込式地下タンクをFig. 1に示す。実験モデルとしてFig. 1の斜線の部分について3種類のモデル化を行った。

1) 接触モデル (Contact Model): 内張鋼板とコンクリート躯体・地盤が接触しているモデル

2) 非接触モデル (Non-Contact Model): 内張鋼板とコンクリート躯体・地盤が接触していないモデル

実際の実験ではFig. 2の様な実験モデルを使用した。

この実験モデルに対する数値実験モデルをFig. 3に示す。

3.2 実験結果と数値計算結果の比較

内張鋼板・コンクリート躯体を設計する為の温度荷重の設定に際して、大気と内張鋼板の間の熱伝達率を実験結果と数値計算結果の比較によって推定する。設定条件として次の条件を採用した。

1) 雰囲気温度 1979年8月19日6時～8月20日6時の実測値を用いる。これをFig. 4に示す。

2) 直射日光による内張鋼板への熱流束 理科年表より、東京8月の直達日射量(ここで、測定値は1961年から1970年までの12時の値の平均)を用い、透過率を1.0としてFig. 4の様に設定した。

内張鋼板の温度の実験結果と数値計算結果を接触モデルはFig. 5に、非接触モデルをFig. 6に示す。Fig. 5より接触モデルでは大気と内張鋼板の間の熱伝達率は $\alpha=10 \sim 15 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 程度、Fig. 6より、非接触モデルでは $\alpha=15 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 程度と推定できる。実際の現象は接触モデルと非接触モデルの間にあると考えられる。

4. あとがき

本論文は基礎実験と数値計算の比較において熱流束を理科年表より推定している為、数値計算の定性的な傾向を把握する程度のものである。しかし、この種の基礎実験と数値計算の比較を進めていくことは直射日光を受ける構造物の熱伝導・

熱応力問題の把握に役立ち、掘込式地下タンクの内張鋼板・コンクリート躯体の熱応力に対する合理的設計法の確立が可能である。この解法の適用面はタンク火災時の隣接タンクの安全性の検討等、輻射熱を受ける構造物全般に及んでいる。

参考文献 1) 清水 俊彦・嶋田 謙二・山本 機械学会論文集43-368(昭52-4)

2) 三瀬 清水 木間, 土木学会第33回年次学術講演会概要集I-14, 1978

3) Zienkiewicz The Finite Element Method in Engineering Science

(1971) McGraw-Hill 4) 日本数学会編, 数学辞典, 岩波書店

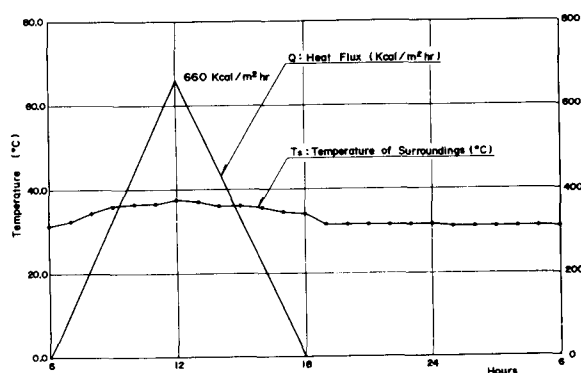


Fig. 4 Heat Input

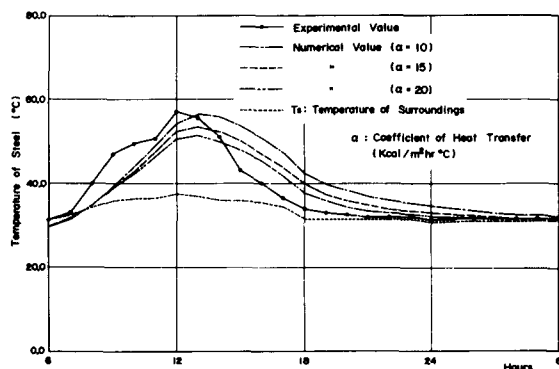


Fig. 5 Contact Model

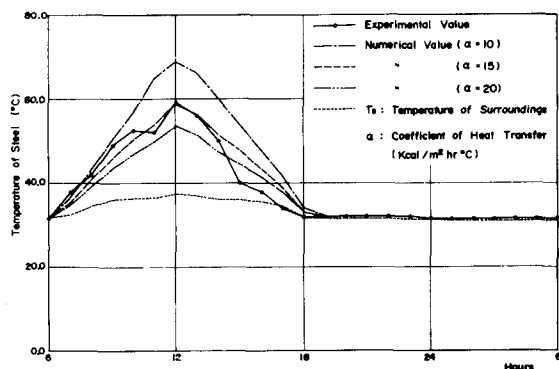


Fig. 6 Non-Contact Model