有限要素法を用いた温度応力解析に関する基礎的考察

九州大学大学院	学生会員	○成田	一晃
九州大学大学院	正会員	園田	佳巨

1. 序論

セメントの硬化時に発生する水和熱によってコンクリート内部の温 度は上昇するが、水和反応終了後はコンクリート表面からの放熱により 部材内の温度は低下する.温度応力とは、この温度低下によるコンクリ ートの収縮が外部から拘束されることで発生する応力である.特に、マ ッシブなコンクリート構造物は、セメントの水和熱が大きいために温度 応力によるひび割れが大きな問題となりうる.本研究では、大型マスコ ンリート構造物を対象とした温度応力によるひび割れ防止工法の開発を 目的とした研究に対して、解析的見地から考察するために基礎的な検討 を行った.今回は、図-1に示すような実規模の壁状構造物の1リフトを 対象とし、側壁の底面が拘束された状態で温度応力解析を行った.

2. 有限要素法による温度応力解析

2-1. 温度分布の計算

温度分布の計算には、式(1)に示す熱伝導方程式を用いた.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \tag{1}$$

ここに、 ρ :密度、c:比熱、T:温度、 λ :熱伝導率、Q:単位面積・時間あたりに発生する熱量である. コンクリートの断熱温度上昇は、式(2)に示すマスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 ¹⁾を用いて求めた.

$$Q(t) = Q_{\infty} \cdot [1 - \exp\{-r(t - t_{0,Q})\}]$$
(2)

 $Q(t): 材齢t 日までの断熱温度上昇量(<math>\mathbb{C}$), Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量, r: 温度上昇速度に関する定数, t: 材齢(日), $t_{0,Q}$: 発熱開始材齢(日)

2-2. 温度応力の計算法

温度解析によって求めた節点の温度変化と熱膨張係数 a (=3×線膨張 係数 a) から,式(3)を用いて温度変化による体積ひずみ ɛ, を求めた.な お,コンクリートは 10 時間で凝結が完了すると仮定し,その時点より温 度応力の計算を開始した.

$$\{\Delta \varepsilon_{\nu}\} = -a \cdot \{\Delta T\}$$
(3)

線膨張係数αについては、図-2のような簡易モデルを作成し、経時変化 を表現した.次に、式(3)で求めた体積ひずみの値から、応力-ひずみマ トリクス[*D*]を用い、式(4)から応力σを求めた.

$$\{\Delta\sigma\} = [D] \cdot \{\Delta\varepsilon_{v}\} \tag{4}$$

ここで、[D]はポアソン比vと弾性係数Eの値によって決定され、弾性係数Eは材齢とともに変化する圧縮強度 f'_c から求めることにした.式(5)は、側壁の材料として設定した早強セメントの材齢に伴う圧縮強度発現式¹⁾で、本解析ではZ=3に示すような経時変化を考慮した.



図-1 解析対象とした壁状構造物







図-3 早強セメントの圧縮強度特性



$$f'_{c}(t_{e}) = \frac{t_{e} - S_{f}}{a + b \cdot (t_{e} - S_{f})} \cdot f'_{c}(t_{n})$$
(5)

 t_e は有効材齢(日), S_f は硬化原点に対する有効材齢(日), t_n は管理材齢(日), a, bはセメント種類と管理材齢に応じた係数である.なお、有効材齢 t_e は以下に示す式(6)を用いて計算している¹⁾.

$$t_e = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \cdot \exp[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}]$$
(6)

式(5)によって求められた $f'_c \varepsilon$,以下の式(7)に代入して得られる弾性係数 E(t)の経時変化を図-4 に示す¹⁾.ここに、 Δt_i は温度継続する時間、 $T(\Delta t_i)$ は Δt_i の間継続するコンクリート温度(°C)、 $T_c=1$ (°C)である.

$$E(t) = \phi \times 4700 \times \sqrt{f_c(t)} \tag{7}$$

 ϕ は低減係数であり、最高温度に達するまでは ϕ =0.42、その後は ϕ =0.65と設定し、底版の弾性係数 Eは 25000(N/mm²)の一定値としている.式(4)で求められた応力 σ を式(8)に代入して等価節点力fを求めた.

$$\{\Delta f\} = \int_{U} [B]^{T} \{\Delta \sigma\} dv \tag{8}$$

このfより式(9)の剛性方程式を解くことで、節点変位uを求め、式(10)を用いてひずみ ε を求めた. [B]はひずみ-変位マトリクスである.

$$\{\Delta f\} = \int_{\mathcal{V}} [B]^T [D] [B] dv \cdot \{\Delta u\}$$
⁽⁹⁾

$$\{\Delta\varepsilon\} = [B]\{\Delta u\} \tag{10}$$

3. 温度応力解析結果

3-1. 解析モデルと解析条件

温度応力解析のモデルを図-5 に示す.ここでは、地盤の上に底版と 側壁を有する壁状構造物を想定している.外気温は図-6 に示す福岡県 の日平均気温(気象庁 2008~2010)を設定し、解析期間は1月1日を打 設開始とする28日間とし、側壁は底版に完全拘束された状態とした. 3-2.温度分布

温度解析によって求めた温度分布を図-7に示す.また,側壁部材の 中心部と端部を着目点とし,温度履歴を示したものが図-8である.水 和熱により上昇した部材内の温度が,外気冷却によって徐々に低下し, やがて外気温と同程度に落ち着くことが示された.

3-3. ひずみ分布

側壁における主引張ひずみの分布を図-9に示す.これより側壁の底 面には引張ひずみが生じ、ひび割れが発生する可能性が高いことがわ かる.また、図の青色は圧縮域を示している.

4. 結論

今回, 壁状構造物を対象として有限要素法による温度応力解析を行

い,コンクリートの自由収縮が拘束された打継ぎ部において発生する引張応力を解析的に求めることができた.今後は,温度応力解析の精度向上を図るとともに,凝結遅延モルタルの敷設によるひび割れ防止工法の効果について 解析的な検討を行う予定である.







図-9 材齢 28 日における主引張ひずみ