有限要素法を用いた温度応力解析によるマスコンクリートのひび割れに関する基礎的考察

九州大学大学院	学生会員	○村田	慶彦
九州大学大学院	正会員	玉井	宏樹
九州大学大学院	正会員	園田	佳巨

1. はじめに

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拘束応力である.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に対して、解析的な観点から基礎的な考察を行った.

2. 有限要素法による温度応力解析

図-1に温度応力解析のフロー図を示す.

2.1 温度解析の概要

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 ・単位時間あたりの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 を用いた.

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

ここに,Q(t):材齢t日までの断熱温度上昇量(\mathbb{C}), Q_{∞} :終局断 熱温度上昇量,r:温度上速度に関する定数,t:材齢(日), $t_{0,Q}$:発 熱開始材齢(日)とする.

2.2 応力解析の概要

温度解析によって求めた節点の温度変化と熱膨張係数 β (線膨張 係数 α を3倍したもの)から,式(3)を用いて温度変化による温度 ひずみ ε_T を求めた.なお、コンクリートは有効材齢4時間から開 始し5時間で凝結が完了すると仮定し、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)で求めた温度ひずみの値から式(4)を用いて温度ひずみ による応力 σ_T を求めた. ここで, [D]は弾性の応力-ひずみマト リクスであり、この[D]に用いる弾性係数 E の値は、コンクリート の若材齢時において変化するため式(5)により経時変化を考慮した.

$$E(t) = \varphi \times 4700 \times \sqrt{f'_c(t) \times 10^6}$$
(5)

ここで、 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 と設定し計算している. $f_c(t)$ は、圧縮強度(N/mm²)

キーワード 有限要素法, 温度応力解析, マスコンクリート 連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地 九州大学大学院工学府 TEL092-802-3370



図-1 温度応力解析のフロー



-443

である.また,既設コンクリートにおいては,弾性係数 E は 25000(N/mm²)の一定値としている.2つの弾性係数の経時変化を図-3 に表す.式(5)において使用されている $f_c(t)$ はコンクリートの材齢ごとの圧縮強度であり,式(6)により求めた.

$$f'_{c}(t_{e}) = \frac{t_{e} - S_{f}}{a + b \cdot (t_{e} - S_{f})} \cdot f'_{c}(t_{n})$$
(6)

ここに, *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. 有 効材齢 *t_e*は以下の式(7)を用いて計算している.

$$t_e = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \cdot \exp[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}]$$
(7)

ここに、 Δt_i は継続時間、 $T(\Delta t_i)$ は Δt_i の間のコンクリート温度(°C)、 $T_0=1(°C)$ である.

続いて、式(4)で求められた仮想応力 $\sigma_T \geq [B]$ を式(8)に代入し等価節点 力fを求め、式(9)の剛性方程式をfにより解くことで、節点変位 u を算 出する.次に式(10)を用いて全ひずみ ε を求めた.温度応力は拘束ひず みにより発生するものであるため、式(11)のように全ひずみから温度に よるひずみ ε_T を除き拘束ひずみを求める.求めた拘束ひずみ $\varepsilon_c \geq [D]$ マ トリクスを用い、式(12)で温度応力 σ_c の増分を求め、式(13)により応力 更新を行うことで一連の温度応力解析を行った.

3. 温度応力解析

温度応力解析のモデルを図-4 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.福岡県の日平均気温(気象庁 2008~2010)を設定し、解析期間は4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.

解析結果として,温度解析によって求めた温度分布を図-5に示す.また,側壁部材の中央部と端部を着目点とし,温度履歴を示したものが図-6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.この端部と中央部の同時期における温度差と,各場所の温度最高点から降下後までの温度差が温度応力に関係していると考えられる.

また,側壁中央部における最大主応力度履歴を図-7に,最大主応力度 分布を図-8に示す.温度履歴における温度降下から応力の増加がみら れ,温度が外気温と同程度に落ち着く時には応力の増加もほぼ収束して いることが示された.このことから,温度応力低減には温度が安定する 材齢5日程度までに対策を打つことが必要と考えられる.

4. 結論

本研究では,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,コンクリートの温度収縮が拘束された打継ぎ部で発生する応力 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,打設・養生時期の環境・施工条件の違いによる解析を行う.



図-8 最大主応力度分布

-886-