

加熱パイプを埋め込んだコンクリート構造物に関する基礎的考察

信州大学 ○学生員足立和也 正会員石川清志 正会員吉澤孝和 土屋工業(株)坂田 隆

1 はじめに

近年、コンクリート本体中に加熱用パイプを埋め込んだ構造物として、室内暖房用の温水循環パイプ一体型床版、およびロードヒーティング設備埋込型コンクリート舗装等がある。本研究はこのようなコンクリート構造物において、内部線熱源による加熱がコンクリート構造物の強度にどのような影響を与えるかを明らかにするために、次のような基礎的な解析および実験を行うものである。

2 解析手法

(1) 温度場 厚さ h の二つの境界平面 $z=-h/2, z=h/2$ で切り取られる床版を考える。この床版の内部に線熱源を置き、熱効率を高めるために床版の中立軸より上部に埋設する。この埋設位置によって床版には不均一温度による内部応力が発生する。そのため温度が時間とともに変化する場合は熱伝導問題を考え、変数分離を応用した固有関数解析を適用する。この場合この問題は、厚さ方向のみに注目した非定常一次元熱伝導問題となる。内部熱源を考慮した熱伝導方程式は、温度を T 、分布熱源 Q 、熱伝導率 k 、比熱 c 、質量密度 ρ 、時間 t としたとき、次の非同次方程式で表される。

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

版の表面境界では熱の流出を考慮し、境界条件を次式で与える。

$$z = -\frac{h}{2} : k \frac{\partial T}{\partial z} = -r[\bar{T}_0(t) - T],$$

$$z = \frac{h}{2} : k \frac{\partial T}{\partial z} = r[\bar{T}_0(t) - T] \quad \bar{T}_0 : \text{外部媒体温度}, r : \text{熱伝達係数}$$

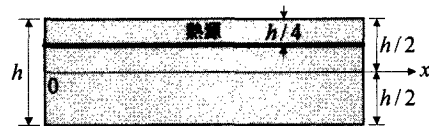


図1 非定常一次元熱伝導問題としたときの床版のモデル

(2) 応力場 応力場では床版のある断面に対して、縦方向変位と不均一熱膨張による曲げたわみの問題を考える。ここで、床版は水平(x)方向に長く、これに直交する断面積は小さいものとする。すなわち、床版の問題を細長い棒あるいは梁の熱応力問題に置き換える。ただし、棒の伸びによる縦方向変位と梁の曲げたわみは連成しないものとする。弾性論によれば、棒の縦変位による軸力 F 、および梁の曲げモーメント M は次式で定義される。

$$F = b \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xx} dz, \quad M = b \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_{xx} dz, \quad \sigma_{xx} = E \left(\frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \alpha T \right)$$

ただし、 σ_{xx} は温度変化による直応力、 u は棒の縦方向変位、 w は梁の曲げたわみ、 E は弾性係数、 b は矩形断面の幅、 α は線膨張係数である。温度 T が (z, t) の関数であるから、 F, M は、

$$F = EA \frac{\partial u}{\partial x} - F_T, \quad M = -EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - M_T$$

となる。ここで、

$$F_T = \alpha E b \int_{-h/2}^{h/2} T(z, t) dz, \quad M_T = \alpha E b \int_{-h/2}^{h/2} z T(z, t) dz$$

$A = bh$: 断面積, I : 断面二次モーメント

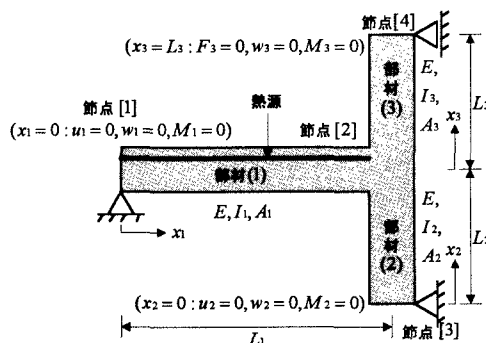


図2 解析モデル

棒の縦方向変位の支配微分方程式および梁の曲げたわみの支配微分方程式は次式となる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 0$$

ここで棒の縦方向変位の微分方程式、および梁の曲げたわみの支配微分方程式の境界条件は解析モデルに応じて適宜設定する。

3 解析モデル

温水循環パイプ一体型床版の横桁梁が柱と剛接合されたラーメン構造について床版の温度上昇に伴って発生する熱応力を調べる。横桁梁は温度上昇に伴って縦変位と軸力を生じ、また温水パイプが横桁梁の曲げの中立軸からはずれた位置に埋設されることにより曲げたわみと曲げモーメントを生じる。柱との剛結により、これらの熱応力が柱の曲げ挙動に直接影響を与えることになる。このときの横桁梁および柱の挙動も併せて調べることにする。ここで解析モデルとして図2のような熱源を有する横桁梁と柱が剛結されたラーメン構造を考える。線熱源は図1のように、床版の中立軸から厚さの1/4だけ上部に埋設されているものとする。また解析に用いる諸元は図2に示すとおりとする。なお、節点[2]は剛結されているので境界条件として変位の適合条件と応力の平衡条件を考えるものとする。

4 コンクリートの圧縮強度試験および実験結果に対する考察

加熱用パイプをコンクリート床版に直接埋設する温水循環パイプ一体型床版において、コンクリートの強度、床版の耐久性といった面から、床版のコンクリート打設後の加熱開始までの日数をどの程度とればよいかは明らかになっていない。強度に関していえば、コンクリートの養生方法の理想は湿潤養生であり、コンクリートを乾燥させれば材令に伴う強度増進は若い材令で停止する。したがって温水循環パイプによる加熱はコンクリートの乾燥を促進させるものであり、その開始時期は重要な問題である。

ここではコンクリート打設後の加熱開始までの空中養生日数に注目し、次のような2種類のコンクリートテストピースの圧縮強度試験を行う。また併せて、同じ日時に製造し加熱を行わないコンクリートテストピースの圧縮強度も調べることにする。(空中養生温度: $10 \pm 5^\circ\text{C}$, 加熱温度: $55 \pm 5^\circ\text{C}$)

(1) テストピース製造後1,2,3,4週間の空中養生を行った後、それぞれについて4週間と6週間の加熱期間を与え圧縮強度試験を行う。

(2) テストピース製造後2日目からただちに加熱を開始し、製造後3,7,14日目の圧縮強度を調べる。

ここで(2)の条件は、コンクリート打設後の加熱開始までの空中養生日数を極端に短期間とし、加熱を行わないコンクリートとの条件の相違を明らかにするものである。

図3は(2)の条件で圧縮強度試験を行った結果である。この結果から、コンクリート打設後の早い時期に加熱によってコンクリートの乾燥を促進させると初期強度は高くなるが、強度増進が若い材令で停止することが分かる。したがって、温水循環パイプ一体型床版において床版のコンクリート打設から加熱開始までには、コンクリートの強度に大きな影響を与えないよう十分な非加熱養生期間を与えなければならない。

5 おわりに

図2のラーメン構造の解析結果、およびコンクリートの圧縮強度試験の条件(1)の結果については、紙面の都合上掲載することができないので、研究発表会当日発表を行うことにする。

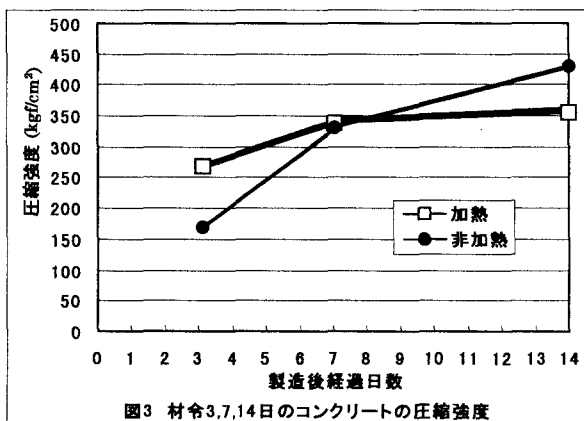


図3 材令3,7,14日のコンクリートの圧縮強度